



Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : Application aux systèmes bananiers de Guadeloupe

Philippe Tixier

► To cite this version:

Philippe Tixier. Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : Application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Sciences de la Terre. Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier - AGRO M, 2004. Français. NNT : . tel-00010937v2

HAL Id: tel-00010937

<https://theses.hal.science/tel-00010937v2>

Submitted on 10 Nov 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier pour obtenir le

DIPLOME DE DOCTORAT
SPECIALITE SCIENCES AGRONOMIQUES

Ecole doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés Agronomie Environnement

Formation doctorale : Science du sol

UMR : Fonctionnement et conduite des Systèmes de culture Méditerranéens et Tropicaux

Conception assistée par modèle de systèmes
de culture durables :
Application aux systèmes bananiers de Guadeloupe

par

Philippe TIXIER

Soutenue le 14 Décembre 2004, devant le jury composé de:

Harry OZIER-LAFONTAINE

Serge SAVARY

Thierry DORE

Eric MALEZIEUX

Walter ROSSING

Jacques WERY

Directeur de Recherche INRA

Directeur de Recherche IRD

Professeur INA-PG

Directeur adjoint UMR System CIRAD

Professor Wageningen University

Professeur AGRO-M

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Remerciements

Il y a maintenant trois ans que le projet de cette thèse passionnante prenait forme. Sa mise en œuvre a nécessité un travail multidisciplinaire, faisant appel à de nombreuses coopérations. Que tous ceux qui m'ont suivi, fourni des conseils, des informations, des appréciations, des facilités soient remerciés.

Ce travail a été possible grâce à l'engagement de mes trois encadrants principaux, depuis les premières esquisses jusqu'au rapport final. Je remercie particulièrement Jacques Wery pour avoir dirigé et orienté mon travail, toujours avec le recul scientifique adapté et de manière très pédagogique. J'exprime toute ma gratitude à Eric Malézieux qui, au-delà du suivi régulier du travail et de ses conseils avisés, a su engendrer un dynamisme scientifique et bouillonnements d'idées particulièrement fertiles. Je témoigne ma reconnaissance à Marc Dorel, pour sa bienveillance, sa rigueur scientifique, ses interventions aux moments opportuns et pour son expertise des systèmes de culture bananiers. Je les remercie à nouveau de la confiance qu'ils m'ont accordée durant ces trois années.

Je remercie la direction du Cirad Flhor, Jean-Pierre Gaillard et Hubert de Bon. Je remercie les responsables du programme bananiers, plantain et ananas – en particuliers Jacky Ganry et François-Xavier Côte pour leur soutien et les facilités mise à ma disposition tout au long de la thèse.

Je témoigne toute ma gratitude à Philippe Girardin, Robert Habib, Hubert Manichon, Harry Ozier-Lafontaine et Marc Woltz, pour m'avoir conseillé de manière constructive à différentes étapes de mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à Andrés Lassoudière, Patrick Quénéhervé, Philippe Girardin et Christian Bockstaller pour leur accueil en Martinique et à Colmar - le partage de leurs connaissances m'a permis de consolider mon travail.

Cette thèse est redevable aux multiples relations établies avec la communauté des chercheurs de la station de Neufchâteau. Je n'oublie pas l'aide précieuse de Jean-Michel Risède sur l'aspect nématologique et les discussions passionnantes avec Philippe Cattan sur les pesticides qui me furent très utiles ; les encouragements de Marc Chillet à propos de 'construction navale' furent très appréciés. Merci à tous pour leur aide et leurs qualités humaines.

Je remercie tout le personnel de la station de Neufchâteau, pour sa gentillesse et sa bonne humeur, pour le climat toujours amical qu'ils ont su instaurer. Je n'oublie pas mes collègues de l'UMR System à Montpellier ; en particulier Sandrine Renoir et Pierre Diamante qui ont réussi à me faire oublier les difficultés administratives.

Tous, tels des catalyseurs, m'ont permis au terme de ces trois ans de finaliser cette thèse.

Merci à tous pour ces trois années passées si vite sous le signe de la passion, des échanges scientifiques, des bananiers, des modèles, et de la Guadeloupe.

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	1
 Chapitre I - Problématique générale.....	5
1. Les systèmes de culture à base de bananiers en Guadeloupe : contexte, déterminisme et évolutions.....	5
1.1. Contexte de la production bananière en Guadeloupe.....	5
1.1.1. Géographie, climat et pédologie de la Guadeloupe.....	5
1.1.2. Aspect historique.....	9
1.2. Contraintes et impacts des systèmes de culture bananiers	12
1.3. Evolution des techniques de culture.....	13
1.4. Vers de nouveaux systèmes de culture bananiers.....	14
2. Problématique scientifique.....	15
 Chapitre II - Elaboration et mise au point d'un modèle de simulation des systèmes de culture bananiers	21
1. Les modèles de simulation de culture.....	21
1.1. Généralités	21
1.2. Type de programmation utilisée	22
1.3. Méthodologie d'agrégation des savoirs.....	23
2. La croissance et le développement du bananier	23
3. Conséquence sur le choix du modèle de simulation des systèmes de culture bananiers SIMBA.....	30
4. Les modules de SIMBA.....	32
4.1. Les plantes cultivées	34
4.1.1. La dynamique d'un peuplement de bananiers	34
4.1.1.1. Concepts et structure de SIMBA-POP.....	34
4.1.1.2. Etude de deux pratiques d'œilletonnage.....	57
4.1.1.2. Etude de deux pratiques d'œilletonnage.....	57
4.1.1.3. Les stress phénologiques et la verse des bananiers.....	61
4.1.2. La croissance des bananiers : SIMBA-GRO	63
4.1.2.1. Introduction.....	63
4.1.2.2. Principes de base de la modélisation dans SIMBA-GRO	63
4.1.2.3. Les équations de SIMBA-GRO.....	66
4.1.2.4. La calibration de SIMBA-GRO	70
4.1.2.5. La calibration des stress de croissance.....	74
4.1.2.6. Exemple de sorties avancées de SIMBA-GRO	77
4.1.3. La canne à sucre (utilisation de MOSICAS)	79
4.1.4. La prise en compte d'autres cultures et la gestion des rotations	79
4.2. Le sol.....	80
4.2.1. La structure du sol –SIMBA-SOL	80
4.2.2. La couverture du sol - SIMBA-COV	83
4.3. Le bilan hydrique	88

4.3.1. Introduction.....	88
4.3.2. Structure du module.....	88
4.3.3. Validation.....	93
4.4. La dynamique des nématodes phytoparasites SIMBA-NEM.....	95
4.5. Le module économique SIMBA-ECO	124
4. Conclusion du chapitre II.....	126

Chapitre III - La construction des indicateurs agro-écologiques 128

1. Objectifs des indicateurs	128
2. Les indicateurs développés	130
2.1. Indicateur de risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires	130
2.2. Indicateur de risque d'érosion	161
2.3. Indicateur de fertilité des sols	166
2.3.1. Indicateur de la composante physique de la fertilité (Rfert-p).....	166
2.3.2. Indicateur de la composante chimique de la fertilité (Rfert-c).....	167
2.3.3. Indicateur de la composante biologique de la fertilité (Rfert-b)	171
3. Le tableau de bord agri-environnemental	174
4. Conclusion du chapitre III.....	175

Chapitre IV - Utilisation de SIMBA pour l'évaluation multicritère et la génération de systèmes de culture plus durables..... 176

1. Les utilisations possibles de SIMBA.....	176
1.1. Concevoir des systèmes de culture pour définir des tendances	176
1.2. Optimiser des pratiques pour des systèmes existants ou innovants.....	177
2. Exemple de prototypage avec SIMBA	177
3. Exemple d'utilisation partielle de SIMBA pour optimiser la date de plantation	205
4. Conclusion du chapitre IV	207

Chapitre V - Conclusion et perspectives 208

1. Les apports du travail.....	208
1.1. Les apports méthodologiques	208
1.2. Les apports du prototypage	209
1.3. Modules de SIMBA pouvant donner lieu à des outils pratiques	210
2. Les limites méthodologiques et la validation de SIMBA	212
3. Perspectives.....	213

Références bibliographiques..... 216

Summary Résumé 236

Introduction

La production bananière constitue une activité importante en Guadeloupe qui structure le tissu économique et social de l'archipel. Les bananeraies sont principalement localisées sur l'île volcanique de Basse-Terre. La production de banane en Guadeloupe s'est beaucoup développée après les années 1960. Actuellement elle traverse une période de crise économique due principalement à des rendements faibles, à des problèmes d'organisation de la filière, des aléas climatiques à répétition et à la compétition avec les autres zones de production où le coût de la main d'œuvre est plus bas. Il y a actuellement, associés à cette production, des problèmes de durabilité agronomique (dus au développement de parasites et à la dégradation des propriétés physiques et chimiques du sol) et de graves dégradations des milieux environnants avec notamment des problèmes de pollution de la ressource en eau par les produits phytosanitaires. La diversité des situations culturelles aussi bien au niveau des pratiques que des situations pédoclimatiques très contrastées rend un constat global hasardeux.

Dans ce contexte, des changements importants dans la manière de produire sont devenus nécessaires. Les planteurs explorent de nouvelles voies, les chercheurs expérimentent de nouvelles techniques de culture et les autorités tentent de promouvoir leurs applications par le biais d'aides spécifiques. Les principales solutions alternatives sont caractérisées par le développement de systèmes optimisés et raisonnés avec une tendance au développement de systèmes qui utilisent moins d'intrants ou de type 'biologiques'. La considération des systèmes de cultures dans leur ensemble et non de manière fragmentaire, comme cela a souvent été le cas par le passé, est devenue nécessaire pour composer avec les différentes facettes de la durabilité. Ceci implique la formalisation des différentes relations entre les processus impliqués dans le fonctionnement du système de culture. Les outils de modélisation sont, à priori, adaptés pour prendre en compte ces différentes composantes et les quantifier.

L'objectif de ce travail de thèse est, dans un premier temps, de construire un outil de modélisation à même d'évaluer les systèmes de culture à base de bananiers répondant au

cahier des charges du prototypage. Dans un second temps il s'agira d'utiliser cet outil dans une perspective de conception de systèmes de cultures plus durables. Ce travail est d'abord de nature méthodologique : 'quel outil construire ? Quelles sorties doit-il fournir ? Comment l'utiliser ?'. Il se traduit ensuite par l'agrégation des connaissances dans un modèle fonctionnel, l'acquisition de nouvelles connaissances cognitives sur certains phénomènes biophysiques et pour finir l'utilisation de l'outil et l'analyse de ses résultats.

Pourquoi utiliser des modèles ? Toute activité scientifique requiert la création d'un modèle conceptuel ou fonctionnel. Dans tous les cas, un modèle permet de structurer le raisonnement et la pensée. Les capacités de calcul actuelles permettent de créer et d'utiliser des modèles, qui vont bien au delà de nos propres capacités de prévisions. Ils permettent ainsi de prévoir l'évolution de phénomènes complexes ou d'explorer des situations virtuelles. Les modèles fonctionnels développés dans ce travail ont pour vocation d'explorer le fonctionnement des systèmes simulés et de tenter de résoudre une problématique originale dont les solutions sont forcement innovants.

Dans le cadre du prototypage de systèmes de culture, des outils de modélisation ont déjà été développés. Les besoins spécifiques de la conception de systèmes à base de bananiers obligent pourtant au développement d'outils prenant en compte les spécificités de cette culture. Cela est principalement dû aux caractéristiques des systèmes bananiers en général et à l'importance de la contrainte parasitaire dans le contexte de production étudié.

Ce travail a donné lieu à plusieurs publications avec notamment 4 articles (1 publié et 3 soumis) ainsi que 3 présentations lors de congrès (1 communication orale et 2 posters).

Articles dans des revues à comité de lecture :

- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling*, 180, 407-417.
- Tixier, P., Malézieux, E., Risède, J-M., and Dorel, M., 2004. Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes: a contribution to the design of sustainable cropping systems. *Soumis à Ecological Modelling*, (July 2004).

- Tixier, P., Malézieux, E., Girardin, P. Bockstaller, C., and Dorel, M., 2004^c. Rpest a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk. Application to banana-based cropping systems in FWI. Soumis à Ecological Modelling, (July 2004).
- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., and Wery, J., 2004. SIMBA: a comprehensive model for evaluation and prototyping of banana-based cropping systems. Soumis à European Journal of Agronomy, (November 2004).

Communication orale lors de congrès :

- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., and Wery, J., 2004. SIMBA a comprehensive model for agro-ecological assessment and prototyping of banana-based cropping systems. An application in the French West Indies. In ‘VII European Society of Agronomy congress - Copenhagen Denmark 15-19 July 2004, book of proceedings’ Jacobsen, S-E., Jensen, C., R., and Porter, J., editors. 968p. 677-678.

Posters et articles lors de congrès:

- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., and Wery, J., 2004. SIMBA: a comprehensive model for agro-ecological assessment and prototyping of banana based cropping systems. An application to the banana cropping systems in French West Indies. In the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, September 2004.
- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M., 2004. Use of a cohort population model to simulate harvest dynamics in multi-cycle banana cropping systems. In the VI European Society of Agronomy congress, Cordoba, July 2001.

<p style="text-align: center;">Chapitre I</p> <p style="text-align: center;">Problématique générale</p>

1. Les systèmes de culture à base de bananiers en Guadeloupe : contexte, déterminisme et évolutions

Aux Antilles françaises les systèmes de culture à base de bananiers résultent de l'interaction de différents facteurs : historiques, naturels, techniques, commerciaux, réglementaires et sociaux. Cette complexité dans leur déterminisme explique leur diversité et leurs contraintes. L'évolution des marchés est l'un des facteurs qui remet en cause la manière de produire et dans une certaine mesure l'existence même de la 'filière banane' aux Antilles (Dulcire et Cattán, 2002).

Tous ces éléments impliquent à très court terme des changements importants, aussi bien au niveau technique que commercial.

Les paragraphes suivants présentent le contexte naturel de la Guadeloupe, les principaux déterminants des systèmes de culture bananiers guadeloupéens ainsi que leurs tendances d'évolution.

1.1. Contexte de la production bananière en Guadeloupe

1.1.1. Géographie, climat et pédologie de la Guadeloupe

L'archipel de la Guadeloupe (16°15'N, 61°32'O) est un département d'outre-mer français (DOM), il est constitué des îles de Basse-Terre (848 km²) et de Grande-Terre (590 km²) ainsi que de dépendances (Marie-Galante, Les Saintes, La Désirade, Petite-Terre, Saint-Martin et Saint-Barthélemy). La capitale économique (Pointe à Pitre) est située sur l'île de Grande-Terre alors que la capitale administrative (ville de Basse-Terre) est située à l'extrême sud de l'île de Basse-Terre, ces deux îles étant séparées par un bras de mangrove : 'la rivière salée'.

Les activités agricoles sont localisées principalement sur les îles de Basse-Terre, Grande-Terre et Marie-Galante (**Figure I.1**). Ces deux dernières sont formées de plateaux calcaires

d'origine corallienne où la culture de la canne à sucre est prédominante. L'île de Basse-Terre est volcanique, et culmine au sommet du volcan 'La Soufrière' à 1449 mètres. Elle abrite la majeure partie de la culture de la banane, concentrée dans la zone dite du 'croissant bananier' comprise entre les communes de Petit-Bourg et de Vieux-Habitants. La production s'étage entre 50 et 800 mètres sur les flans du volcan exposés aux alizés de la côte dite 'au vent'. Les deux côtes sont caractérisées par des gradients pluviométriques différents dus à l'effet de Föhn, de 2500 à 10000 millimètres d'eau par an en côte au vent et de 1000 à 5000 millimètres en côte sous le vent (**Figure I.2**).

Les sols de la Basse-Terre dépendent de l'âge et de la nature des matériaux volcaniques dont ils sont issus. La diversité des sols de cette île est classique pour une zone tropicale humide (Delvaux et al., 1989). La **figure I.3** présente les différents types de sol de l'île de Basse-Terre.

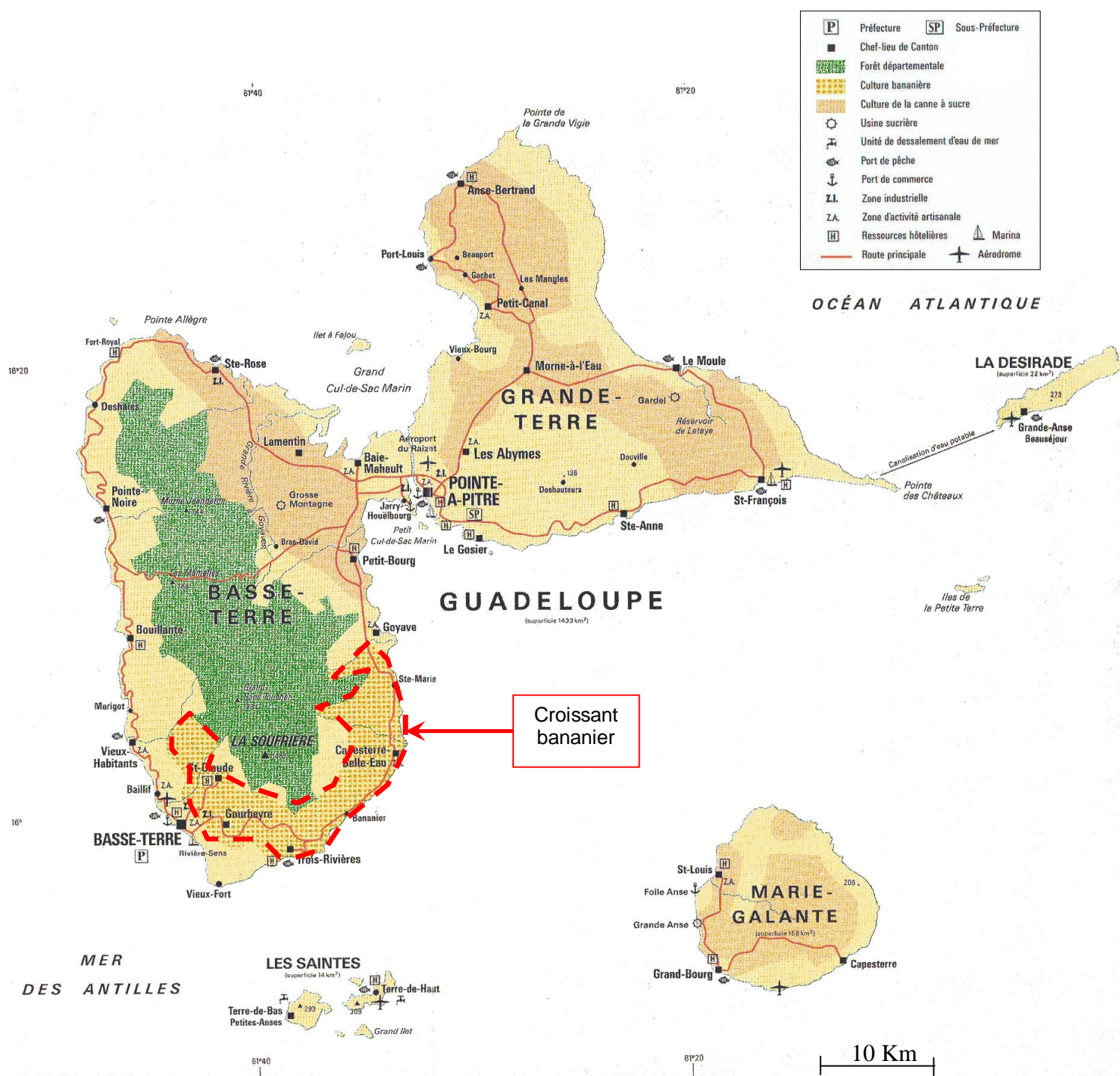


Figure I.1. Carte de la Guadeloupe et sole bananière (D'après Cornaille, 2002).

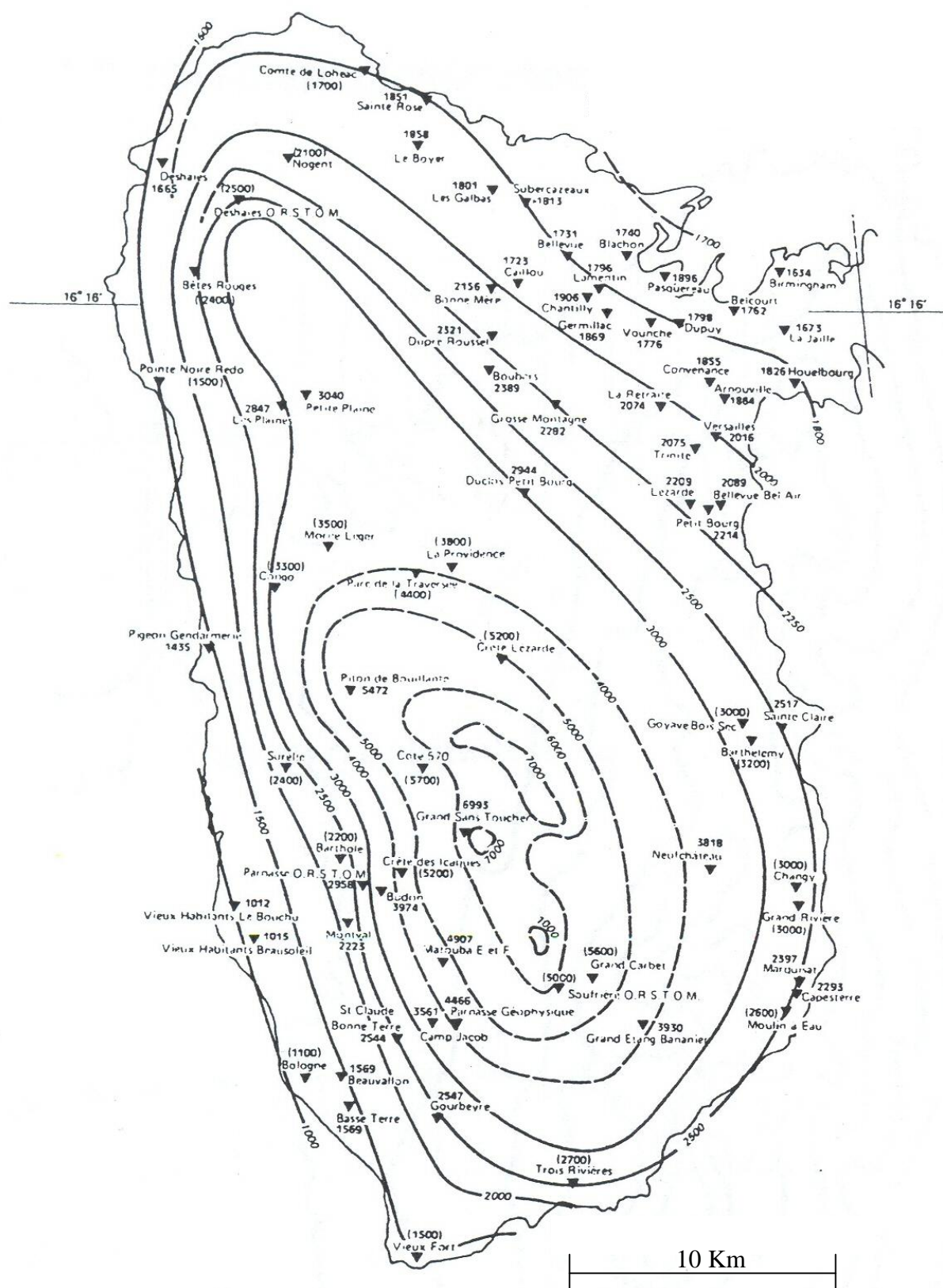


Figure I.2. Carte des isohyètes interannuelles de la Basse-Terre (pluviométrie annuelle en millimètres), période 'homogénéisée' de 1929 – 1978 (d'après Chaperon, 1985).

Dans la zone de la culture bananière, sur le versant Est de la Soufrière on observe :

- des andosols perhydratés à gibbsite, entre 500 et 300m
- des andosols entre 300 et 150m,
- des sols bruns, qui ont conservé certains caractères andiques dans les horizons profonds, entre 150 et 100m,
- des sols brun-rouille à halloysite (altitude inférieure à 100m), dépourvus de caractères andiques et fortement ferrallitisés dans les zones les plus basses.

Sur le versant ouest on trouve :

- Des sols brun-rouille à halloysite en dessous de 400m, contenant également des smectites dans les parties les plus basses,
- Des andosols et des sols bruns andiques entre 400 et 600m,
- des andosols perhydratés sans gibbsite entre 600 et 800m.

Au nord de la ligne Capesterre - Vieux-habitants les sols sont issus d'un matériau plus ancien (Pleistocène) et moins perméable (Colmet-Daage et Lagache, 1965). Les sols ferralitiques occupent tout le versant est. Sur le versant ouest se trouve :

- des sols ferralitiques au dessus de 500m,
- des sols fersiallitiques et des vertisols en dessous de 500m.

Le potentiel agroclimatique de la banane en Basse-Terre est variable selon l'altitude et les sols. Ce potentiel est de l'ordre de 60 tonnes par hectare et par an dans la plaine de Capesterre Belle-Eau et tend à décroître avec l'altitude.

1.1.2. Aspect historique

La production de bananes aux Antilles françaises s'est développée à la fin de la première moitié du XX^{ème} siècle, après la mise en place de mesures protectionnistes pour la banane française en 1928. L'expansion de la culture du bananier s'est faite au détriment de celle du café et de la canne à sucre. Cette production antillaise n'est qu'une faible part de la production mondiale de banane, actuellement localisée en Asie, en Amérique Latine et en Afrique. Le marché des bananes antillaises est caractérisé par des réglementations protectionnistes Européenne (Française en particulier), avec l'instauration de quotas favorisant les pays ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique) de 1962 à 1993. Puis sous la contrainte de l'OMC

(Organisation Mondial du Commerce) les quotas disparaissent au profit d'une aide compensatoire, qui garantit le prix de vente. En 2006, alors que cette aide devrait disparaître sous la pression de l'OMC, diverses options sont envisagées comme le financement de mesures environnementales par exemple.

En 2000, la banane occupait 5750 hectares dans le croissant bananier, sur les 8300 hectares de la surface agricole utile de cette zone. Les exploitations Guadeloupéennes sont caractérisées par leur petite taille. Le rendement moyen est faible, environ 20 tonnes par hectares alors que le potentiel de production se situe aux alentours de 60 tonnes par hectares (Lassoudière, 1978^a). Le contexte social, les problèmes d'endettement, la maîtrise imparfaite des techniques culturales ainsi que les catastrophes naturelles sont en partie responsables de ces faibles rendements (Malessard, 1999).

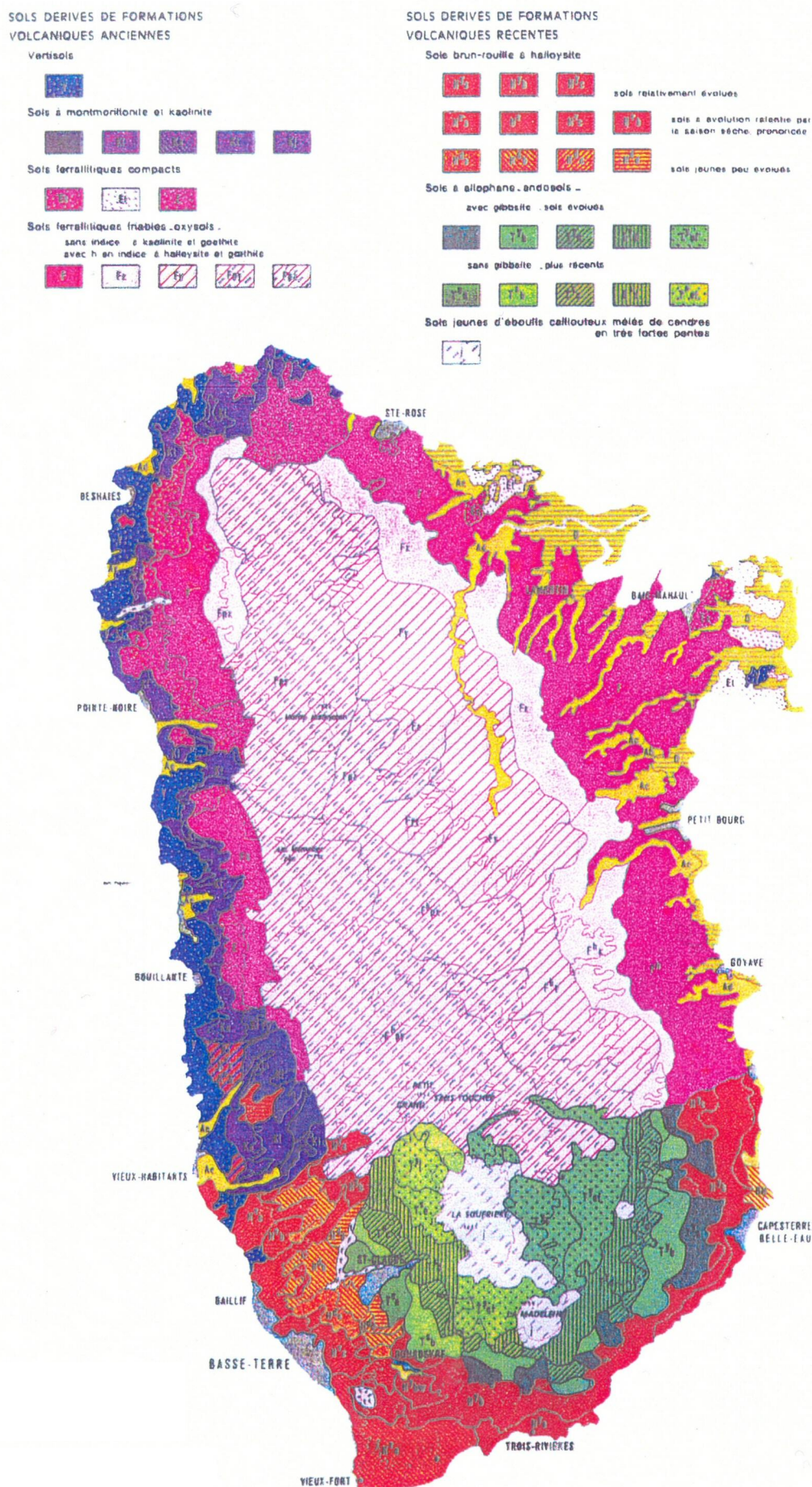


Figure I.3. Carte pédologique de la Basse-Terre (d'après Colmet-Daage, 1979)

1.2. Contraintes et impacts des systèmes de culture bananiers

Les systèmes de cultures à base de bananiers en Guadeloupe sont soumis à de fortes contraintes agronomiques (principalement d'ordre parasitaire) et socio-économiques.

Les bananeraies sont soumises à divers pathogènes.

- Le parasitisme tellurique est la principale contrainte pour la culture. Le complexe parasitaire du sol est dominé par des nématodes phytoparasites, dont les principales espèces sont *Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*, *Meloïdogyne sp.* *Helicotylenchus multicinctus* (Gowen et Quénéhervé, 1990) et par des champignons : *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* (Saravanan et al., 2003) et *Cylindrocladium pathiphylli* (Risède et Simoneau, 2004). Le rhizome du bananier est également soumis aux attaques d'un charançon (*Cosmopolites sordicus* ; Viladebó, 1984) dont les larves, qui provoquent des lésions au niveau du bulbe du bananier et des insertions racinaires, peuvent entraîner la chute du bananier et des troubles trophiques.
- La cercosporiose, autre contrainte pour cette culture, provoque des nécroses sur le feuillage. Deux types de cercosporioses existent (Mourichon et al., 1997 ; Carlier et al., 1999) : la cercosporiose jaune (*Mycosphaerella fijiensis*) et la cercosporiose noire (*Mycosphaerella musicola*). La cercosporiose noire est la forme la plus virulente mais n'est pas encore présente aux Antilles françaises. La cercosporiose jaune provoque des lésions sur les feuilles ; non traitée elle entraîne le dépérissement de la plante.

Comme c'est le cas dans ce type de monoculture d'une plante ayant une base génétique très étroite (les bananiers des systèmes pour l'export sont basés sur quelques variétés triploïdes *acuminata* du sous-groupe Cavendish génotype AAA), il y a développement d'un parasitisme spécifique.

Le parasitisme de ce système monocultural induit une lutte chimique intensive qui provoque une pollution du milieu (sol, eaux de surface, nappes phréatiques) par les produits phytosanitaires. La lutte contre la cercosporiose fait appel à des formulations fongicides huileuses appliquées principalement de manière aérienne. Les pathogènes telluriques sont contrôlés par des produits nématicides et insecticides. Avant 1993 ces produits phytosanitaires

étaient à base de molécules organochlorées. Utilisés massivement, ils ont contaminé les sols, les eaux et les sédiments des rivières (Kermarrec, 1979 ; Bonan et Prime, 2001). Ces matières actives très toxiques ont un effet rémanent très important ; nous les retrouvons dans les eaux de ruissellement et de drainage des zones de culture. Cette pollution a déjà engendré la fermeture temporaire de captages d'eau pour la consommation humaine (Bonan et Prime, 2001). Ces substances actives ont également été retrouvées dans certains végétaux, principalement des légumes de type racines, cultivés sur les sols contaminés (Grugeaux, 2003).

Actuellement pour lutter contre le parasitisme tellurique des matières actives organophosphorées sont utilisées. Ces molécules ont des rémanences beaucoup plus faibles que les organochlorés. Elles ont cependant des toxicités élevées et se retrouvent également dans les eaux de ruissellement et de drainage des parcelles cultivées (Dorel et al., 1996), ainsi qu'au travers de la faune du sol (Olvera-Velona et al., 2003). Les mécanismes de transfert de ces matières actives au sein d'une parcelle cultivée et d'un bassin versant sont complexes, principalement du fait de la géologie volcanique de l'île. Ils sont actuellement en cours d'étude.

En plus de ces problèmes de pollution des eaux, les systèmes de culture bananiers sont susceptibles d'entraîner des exportations de terre vers les rivières et le lagon. Ces phénomènes d'érosion, particulièrement importants dans les systèmes mécanisés à replantation fréquente sur fortes pentes et en altitude (Khamssouk et Roose, 2003), entraînent une dégradation de la fertilité des sols.

Les normes françaises et européennes sont de plus en plus contraignantes en matière d'utilisation des produits phytosanitaires. La liste des produits herbicides, insecticides, nématicides et fongicides autorisés se réduit progressivement. Les produits nématicides et insecticides sont particulièrement visés en raison de leur forte toxicité. La politique agricole européenne s'oriente donc vers une diminution voir une suppression des produits phytosanitaires.

L'environnement socio-économique représente également un frein important au développement des exploitations bananières en Guadeloupe. Les problèmes de trésorerie sont dus principalement à la baisse des prix de vente, aux catastrophes climatiques successives et

aux aides financières souvent versées tardivement. Le contexte social est difficile : des grèves à répétitions ont entraîné un endettement pour beaucoup de planteurs. Les exploitations sont d'autant plus fragiles qu'elles sont souvent de petite taille.

1.3. Evolution des techniques de culture

L'évolution et la prise en compte des contraintes des cultures ont entraîné des modifications économiques et environnementales des pratiques culturelles en bananeraie. Les principales évolutions des systèmes de cultures des 30 dernières années ont porté sur différents points (Ganry 2001) :

- Pour le travail du sol, l'utilisation d'outils permettant d'ameublir les sols sans créer de semelle de labour s'est répandue, permettant une relative amélioration de la situation dans certaines zones (Dorel, 2001).
- La lutte contre les bio-agresseurs a engendré une utilisation massive de produits phytosanitaires. La tendance est à la réduction des quantités de matières actives appliquées ainsi qu'au choix (en relation avec la réglementation) de molécules moins toxiques pour l'homme et pour l'environnement. Ces réductions ne sont possibles que dans le cadre du suivi de l'évolution des populations de pathogènes. Des résultats très significatifs ont été obtenus dans la lutte contre la cercosporiose jaune, en réduisant de 40 à 4 le nombre de traitements annuels grâce à une cellule de surveillance et d'alerte.
- L'utilisation lors de la plantation de plants issus de la culture in vitro a constitué une avancée importante dans la lutte contre les nématodes phytoparasites. Contrairement au matériel végétal traditionnel (constitué de rejets ou des souches de bananiers prélevés sur une autre parcelle) ce matériel est normalement sain, sans parasite (nématodes).
- La rotation des parcelles cultivées et des jachères a permis, en suivant la décroissance des parasites telluriques au cours des cycles de culture (nématodes phytoparasites), de planter dans des conditions optimales, réduisant l'emploi des produits phytosanitaires associés.

- Pour augmenter la qualité des fruits produits, il est nécessaire de bien contrôler leur âge physiologique qui doit être constant. Des pratiques ont été mises en place : le marquage des régimes au moment de la floraison et l'application d'un modèle de prévision de récolte (intervalle en somme de température entre la floraison et la récolte). Ceci, en complément des pratiques post-récoltes (optimisation du transport, de la découpe des fruits et des traitements fongicides avant emballage) a permis d'augmenter considérablement la qualité des fruits.

1.4. Vers de nouveaux systèmes de culture bananiers

Les évolutions des systèmes de culture bananiers aux Antilles seront principalement dues au nouveau contexte économique, aux réglementations toujours plus contraignantes liées aux exigences de la société. D'ores et déjà certaines tendances se dégagent :

- De manière générale l'agriculture raisonnée, après avoir été un signe distinctif pour quelques agriculteurs soucieux de l'environnement et de la qualité des produits, est en train de devenir une norme standard de production. La pratique de la culture bananière raisonnée n'est pas récente aux Antilles Françaises. Depuis 1972 c'est sur la base des avertissements bioclimatiques que l'on combat la cercosporiose – ceci a permis de réduire de manière considérable les quantités de fongicides appliquées sur les bananeraies. Le raisonnement des autres pratiques, tel l'apport de produits nématicides, est en cours de mise en place. Cette pratique est plus difficile à raisonner du fait qu'elle repose sur les mesures relativement lourdes de la quantité intra-racinaire de nématodes phytoparasites et sur l'instauration de jachères assainissantes. Ces mesures ont notamment été testées lors du suivi des premiers contrats territoriaux d'exploitation (CTE ; Dorel, 2000) visant à aider au financement des rotations des bananiers avec la jachère. La fertilisation peut également être raisonnée en s'appuyant sur les enquêtes diagnostiques menées qui ont permis de poser les bases de la nutrition minérale des bananiers. Ce raisonnement de la fertilisation repose sur l'ajustement des quantités d'engrais aux besoins de la plante pour un objectif de rendement donné, ajustement de la fertilisation aux propriétés d'échange du sol et contrôle par des analyses du sol et de la plante (Marie, 2000). Dorel (2001) propose une méthode de raisonnement de la préparation du sol pour la plantation d'une bananeraie en fonction du type de sol et de l'état structural initial. De manière générale, une des

difficultés dans la mise en place de raisonnements des pratiques réside dans le fait qu'ils engendrent souvent des surcoûts, parfois temporaires, mais difficilement supportables par des exploitations endettées (Bonin et al., 2004).

- Une autre tendance d'évolution est la suppression des produits phytosanitaires ou la mise en place de systèmes d'agriculture biologique. De tels systèmes existent dans d'autres pays (République Dominicaine par exemple) ou même chez quelques exploitations aux Antilles françaises. Ils remettent en cause la manière de produire, voir même le produit final qui ne répond plus aux mêmes critères et qui ne vise plus les mêmes consommateurs (de Lapeyre de Bellaire, 2000). Pour atteindre cet objectif les nouvelles variétés développées par le CIRAD (Jenny, 2000) sont un élément de réponse supplémentaire.
- Les systèmes de culture proposés par les différents programmes de recherche agronomique reposent principalement sur une meilleure gestion de l'assolement dans l'espace et dans le temps. Cette gestion passe souvent par la mise en place de rotations culturales avec diverses plantes ou par des associations en cours de culture avec des plantes dites «de service» : parasites différents de ceux du bananier, amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol, meilleure couverture du sol avec revenus potentiels complémentaires (Malézieux et al. 2004). L'étude de l'agencement spatial des cultures à des échelles plus grandes que la parcelle (exploitation, territoire) représente également une autre piste actuellement explorée ; elle vise notamment à limiter les transferts des nématodes phytoparasites d'une parcelle à une autre (Chabrier, 2000), à limiter les transferts de produits phytosanitaires vers les eaux de surface et de profondeur (Cattan et al., 2003) ou à avoir une vision de conservation du paysage et de la biodiversité de manière intégrée. Les nouveaux systèmes de culture doivent également être performants au niveau économique, pour cela ils doivent tenir compte de l'évolution du marché. La maîtrise des coûts et de la répartition dans le temps de la production sont des éléments clés pour atteindre cet objectif (Ganry, 2001).

Ces différentes approches remettent souvent en cause la manière traditionnelle de « penser » les systèmes de culture bananiers et nécessitent l'adoption d'une approche globale à différentes échelles de temps et d'espace. Pour cela différents outils sont nécessaires : les modèles de simulation et d'évaluation en font partie (Boiffin et al, 2001).

2. Problématique scientifique

Dans le cadre de la problématique actuelle sur le développement durable de milieux agricoles, les agronomes sont confrontés à des problèmes multidisciplinaires, leur résolution nécessitant souvent une approche globale des pratiques agricoles et des agrosystèmes. Il s'agit de concilier des objectifs à court et long terme, des impératifs économiques et environnementaux, les intérêts des agriculteurs et de leurs partenaires, les attentes des citoyens vis-à-vis du monde rural et les projets des sociétés locales (Meynard et al., 2001). Pour traiter ces questions, le concept de système de culture constitue un outil privilégié, du fait de ses dimensions temporelles et de son aspect intégrateur, pour l'agronome qui désire analyser les pratiques culturales dans un environnement et un climat donné. Un système de culture peut être défini comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique ; chaque système de culture se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures » (Sébillote, 1990). Un système de culture constitue un système complexe qui, au sein d'une zone géographique donnée évolue au cours du temps avec des contraintes associées. Le système de culture est un concept qui permet d'étudier la façon dont évolue un espace cultivé sur plusieurs années, il permet de prendre en compte la durée dans l'analyse des situations culturales (Lacoeuilhe, 1996).

L'amélioration des systèmes de culture doit prendre en compte aussi bien leur grande diversité (sol, climat, pratiques,...) que la grande instabilité de leur contexte (marché, réglementation, innovation génétique,...). C'est pour cela qu'il n'existe pas de solution immuable et universelle mais un grand nombre de solutions possibles qui se doivent d'être adaptatives (Meynard et al., 2001). Les solutions proposées doivent intégrer les acteurs concernés par ces problèmes et considérer la coordination entre des actions dont les effets s'expriment sur des espaces différents. La conception de systèmes de culture innovants repose à la fois sur des recherches cognitives visant à comprendre les processus impliqués dans l'agrosystème et sur des recherches visant à les diagnostiquer. La capacité d'évaluation des systèmes existants ou innovants est donc un des éléments clé du prototypage des systèmes de culture. Différentes méthodes d'évaluation existent elles doivent permettre de porter un jugement sur le système. Les phénomènes complexes ayant lieu au sein d'un agrosystème peuvent être rendus plus lisibles par l'intermédiaire d'indicateurs (Bockstaller et al., 1997). L'évaluation principalement agronomique et environnementale des systèmes de culture a

suscité le développement de nombreuses technologies aussi variées que l'évaluation énergétique des systèmes (Lefroy et Rydberg, 2003), ou celle des performances agronomiques.

D'une manière générale, l'innovation peut prendre deux principales formes :

- nouvelles techniques,
- nouveaux agencements des techniques existantes.

Ces deux types d'innovations ne nécessitent pas les mêmes recherches. Le premier nécessite une réflexion amont et des tests des pratiques. Il peut s'agir aussi bien de l'utilisation de nouveaux intrants, que de nouvelles associations culturales ou bien de l'utilisation de nouveaux outils. Ce type d'innovation peut se baser sur l'observation et l'imitation des systèmes naturels (Ewel 1999). Le second type d'innovation correspond plus à une optimisation des techniques dont dispose l'agriculteur, aussi bien au niveau stratégique que tactique.

Pour tester des nouvelles combinaisons de pratiques l'expérimentation factorielle est une méthode classique. Cette méthode permet de tester de manière optimale, dans un milieu donné, la combinaison d'un petit nombre de pratiques ; elle trouve des limites dans le nombre de combinaison qu'il est possible de tester ainsi que dans le temps nécessaire pour les réaliser. A cause de ces limites, l'utilisation de modèles de simulation d'un ou plusieurs phénomènes impliqués dans le système que l'on tente d'améliorer s'est généralisée. Les modèles permettent de fournir des réponses rapides pour l'adaptation des techniques culturales à un nouveau milieu ou à une évolution du contexte, ils permettent de tester un grand nombre de scénarios techniques, d'explorer la sensibilité des résultats au climat ou à une évolution du contexte.

Dans le processus de « prototypage » Vereijken (1997) propose 5 étapes qui comprennent :

- la hiérarchisation des objectifs à atteindre,
- la transformation de ces objectifs en paramètres,
- la conception d'un prototype théorique,
- le test de ce prototype dans des fermes expérimentales,
- la dissémination du prototype par le biais d'un groupe de fermes pilotes.

Les modèles permettent d'aider à la conception et au choix du ou des prototypes à tester. Ils sont donc utilisés dans ce cadre comme des outils d'exploration et non comme des outils prédictifs (Rossing et al. 1997). Dogliotti et al. (2004) propose une méthode pour développer des prototypes pour des systèmes maraîchers en Uruguay, en basant leur approche au niveau stratégique, principalement sur l'optimisation des rotations et des périodes d'inter culture. Cette démarche se base également sur un outil (ROTAT) utilisé de manière préliminaire permettant de générer et de sélectionner les rotations potentiellement durables et viables (Dogliotti et al., 2003).

D'autres approches, qui abordent de manière plus spécifique le niveau tactique, ont été développées, comme le modèle BETHA (Loyce, 1998) qui permet de générer, évaluer et trier les systèmes de cultures à base de blé éthanol. Certaines approches de prototypage et de pilotage des systèmes de culture visent à chercher à chaque pas de temps (celui du modèle de simulation utilisé) les meilleures pratiques à réaliser. Cette méthode a par exemple été utilisée pour les systèmes production de tomates sous serre (Tchamitchan, 1998). Ce type d'approche permet une adaptation des pratiques à l'environnement et répondent aussi bien aux exigences du prototypage que du pilotage.

Le choix de l'approche par modèle pour les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe

Dans le cas des systèmes de culture à base de bananiers la conception de systèmes nouveaux implique la prise en compte de nombreux phénomènes, tels que les variations du peuplement cultivé et son hétérogénéité, le parasitisme ou les caractéristiques du sol. La prise en compte de l'évolution du peuplement d'une plante semi pérenne et de la dynamique de la contrainte parasitaire sont deux éléments clés dans la simulation à long terme des systèmes de culture bananiers.

La complexité de ces systèmes ainsi que les nombreuses contraintes qui leurs sont associées impliquent de porter un jugement sur les systèmes existants ou innovants sur plusieurs critères. L'évaluation multicritère (agronomique, environnementale et économique) est donc un des points fondamentaux du travail d'amélioration et de conception de ces systèmes. L'intégration d'un modèle économique est également un des points clés. Il permet de prendre en compte cet aspect souvent décisif dans la pertinence d'un système. Le couplage de

modules économiques et biophysiques est de plus en plus développé (Münier et al., 2004 ; Belcher et al., 2004).

Un autre aspect très important à prendre en compte est le fait que les phénomènes impliqués sont liés entre eux et sont extrêmement variables au cours du temps. L'aspect dynamique des phénomènes est donc le second point clé à mettre en avant dans la conception de ces systèmes. En effet l'innovation passe également par la maîtrise, le contrôle et l'agencement temporel des différentes dynamiques physiques ou écologiques.

Afin d'être en mesure de prendre en compte ces deux aspects (analyse multicritère et aspect dynamique des phénomènes) une approche permettant la simulation dynamique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement de ces agrosystèmes est nécessaire. Les outils de modélisation existant ne sont pas capables de prendre en compte les phénomènes centraux dans la problématique des systèmes de culture bananiers que sont la simulation de l'évolution du peuplement de bananiers sur le long terme et la dynamique de la contrainte parasitaire tellurique. Ces caractéristiques ne peuvent pas être prises en compte par les modèles de culture existants. Il était donc nécessaire de développer un modèle spécifique ayant ces aptitudes.

Les outils de simulation développés trouvent naturellement leur place dans une démarche de développement de systèmes de culture. La **figure I.4** présente la place des modèles dans la démarche globale de 'prototypage'.

Les modèles représentent une étape importante dans le processus de conception de systèmes optimisés ou 'innovants'. Dans le cadre de cette étude, il s'agit principalement de parvenir à des propositions de systèmes innovants plus durables, à tester au champ. Les phases d'expérimentation système et de diffusion de l'innovation ne sont pas abordées ici.

Afin d'appliquer une telle méthode aux systèmes de cultures à base de bananiers, les outils suivants ont été développés :

- un module de génération des pratiques à partir de règles de décision,
- un ensemble de modules biophysiques de représentation des phénomènes physiques chimiques et biologiques des systèmes simulés et un module économique (chapitre II),

- un ensemble de modules qualitatifs permettant de calculer des indicateurs de risques environnementaux (chapitre III),
- un module d'analyse multicritère des systèmes de cultures simulés (chapitre IV).

Cette approche par modèle permet notamment de tester, dans leur gamme de validité, un très grand nombre de combinaisons de pratiques. Elle constitue aussi un moyen efficace d'agréger des connaissances relatives à des disciplines aussi variées que l'agronomie, la physiologie végétale, la pathologie et la défense des cultures, la science du sol ou les sciences de l'environnement.

Faisabilité (mise en valeur et agrégation des données existantes)

Le fait d'aborder l'étude des systèmes de culture de manière globale et non spécialisée comme cela s'est fait jusqu'à présent est possible grâce à l'avancée des outils d'analyse en général et informatiques en particulier. Cette approche, par des outils fonctionnels, est de plus en plus nécessaire pour répondre aux questions posées aux scientifiques. Elle pose cependant des problèmes conceptuels et techniques. L'approche de modélisation globale qui a été retenue, bien adaptée au cas précis des systèmes de cultures à base de bananiers aux Antilles, présente des potentialités et des perspectives très intéressantes dans la résolution des problèmes posés par ces systèmes. La conception de ces outils de représentation fonctionnelle permet également de souligner les savoirs manquants qu'il serait important d'acquérir. Ils sont donc susceptibles d'être des outils de gestion et d'agrégation des recherches plus cognitives développées dans les différentes disciplines relatives aux systèmes étudiés.

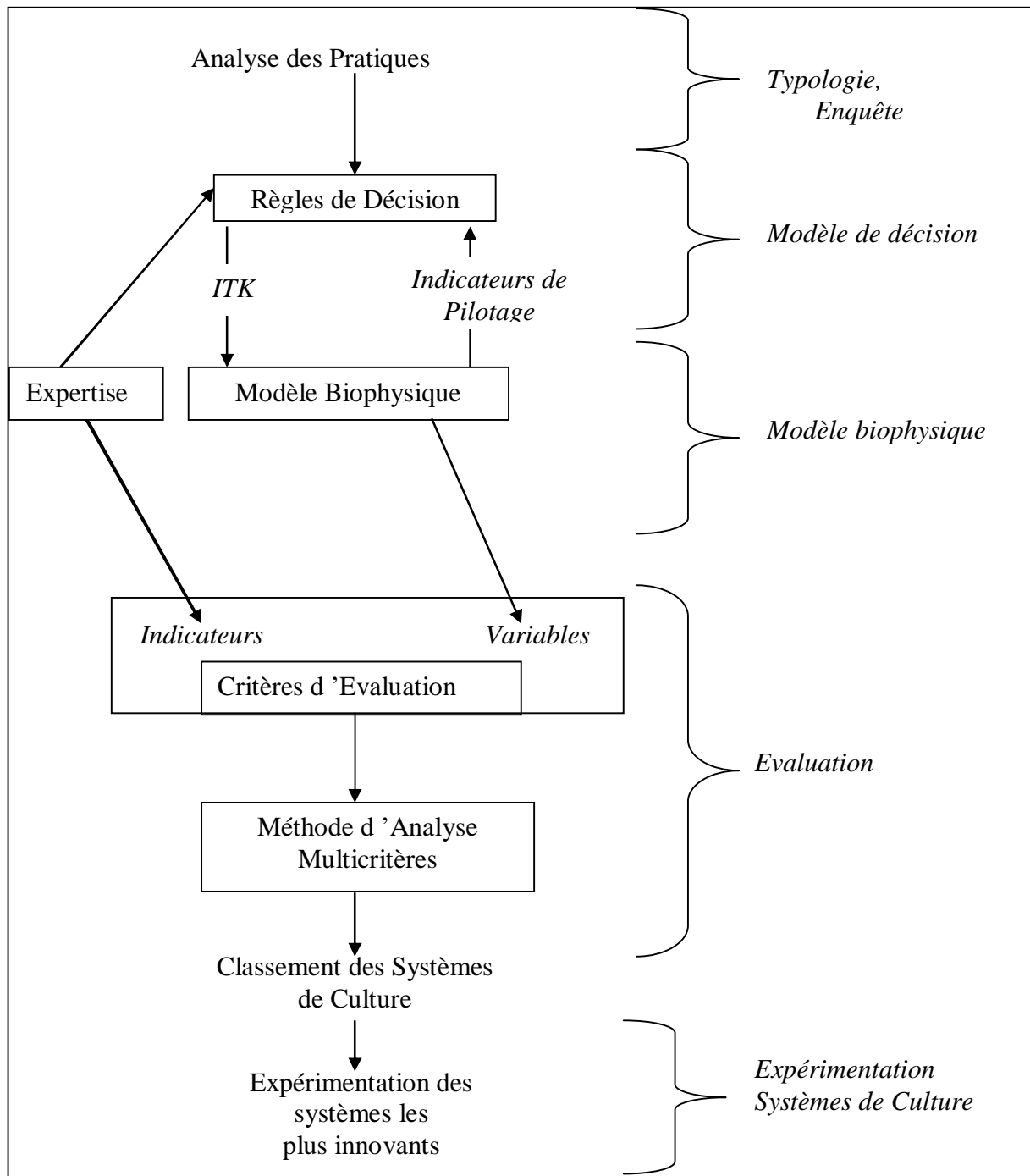


Figure. I.4. Démarche de conception de systèmes de culture associant modèle biophysique, savoirs-experts et modèle de décision.

<p style="text-align: center;">Chapitre II</p> <p style="text-align: center;">Elaboration et mise au point d'un modèle de simulation des systèmes de culture bananiers</p>
--

1. Les modèles de simulation de culture

1.1. Généralités

Les modèles de culture et de systèmes de culture développés durant les 25 dernières années ont beaucoup évolué. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques ou physiologiques, parfois les impacts environnementaux et les performances économiques de ces systèmes. Ces modèles sont plus ou moins complexes et ont des objectifs variés (estimation du rendement, étude des transferts de matière comme les solutés, risques environnementaux...). Ces modèles considèrent le système sol - plante - atmosphère dans son environnement physique et technique. La complexité des phénomènes simulés, leur échelle spatiale et le pas de temps sont relatifs aux objectifs de simulation.

Tous les modèles sont basés sur une simplification des phénomènes biophysiques ayant lieu dans le système considéré, cette simplification visant à rendre compte des principaux phénomènes hiérarchisés selon l'objectif du modèle. L'échelle spatiale la plus courante est la parcelle agricole, parfois la placette. Le milieu est considéré comme homogène sur la zone simulée. Le pas de temps de calcul est généralement compris entre l'heure et l'année, le pas de temps le plus fréquent étant la journée. Les principales variables d'entrée sont de type climatique (forçage climatique), les caractéristiques du sol comme la texture et la profondeur, les pratiques culturales. La description d'une situation initiale est requise. Les sorties des modèles de culture dépendent des objectifs du modèle et de sa nature. Les sorties agronomiques comprennent généralement le rendement, la biomasse, l'indice foliaire ('Leaf Area Index' LAI) et des indices de stress. Certains modèles ont des sorties environnementales concernant le plus souvent l'exportation de composés chimiques : lixiviation du nitrate, exportation de produits phytosanitaires ou consommation en eau. Ces modèles sont le plus souvent organisés en modules fonctionnant en interaction.

Les modèles de culture existants (Tableau II-1) présentent un ensemble varié de caractéristiques.

Tableau II-1. Comparatif des sorties et des fonctionnalités des principaux modèles de culture et de système de culture existants.

Sorties \ Modèles	APSIM	CROPSYST	DSSAT	STICS	WALNULCAS
Agronomiques	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Economiques	Oui	Non	Oui	Non	Non
Environnementales	Partiel (N)	Oui	Partiel (N, CO ²)	Partiel (N)	Partiel (N)
Simulation sur le long terme	Non	Oui	Non	Non	Oui
Simulation des rotations	Non	Oui	Non	Non	Non
Simulation d'une population	Non	Non	Non	Non	Non
Parasitisme	Non	Non	Non	Non	Oui

Les modèles de culture, comme tous les modèles, correspondent à une représentation implicite d'un système (le système sol – plante – atmosphère en l'occurrence). Cette représentation nécessite d'avoir 'un point de vue' sur le système, pris en fonction des objectifs d'utilisation du modèle. Il ne s'agit pas d'y inclure toutes les connaissances dont on dispose sur le système mais d'avoir une approche simplifiée et analogique qui s'appuie sur une hiérarchisation implicite de l'importance des mécanismes en vue de l'objectif affiché (Brisson et Wery, 2002).

De manière générale la croissance est simulée selon 2 composantes :

- le développement qui est piloté par le temps physiologique, basé sur la notion de somme de degrés-jour (Bonhomme, 2000),
- l'accumulation de biomasse qui est basée sur l'interception du rayonnement par le feuillage, la matière sèche étant calculée à partir du rayonnement actif pour la photosynthèse (PAR), de l'efficacité d'interception du couvert et de l'efficacité photosynthétique de la culture (Radiation Use Efficiency, RUE).

D'autres approches existent notamment l'utilisation de l'efficacité de la transpiration pour calculer l'accumulation de biomasse.

Le rendement quand à lui peut-être calculé en deux temps (calcul du nombre d'organes récoltés puis calcul du poids élémentaire de ces organes), ou calculé à partir d'un indice de récolte (rapport de la biomasse des organes récoltées à la biomasse totale).

1.2. Type de programmation utilisée

L'aspect technique de la conception d'un modèle joue un rôle non négligeable. Le type de programmation et le langage utilisés vont influencer le champ des développements possibles.

Dans le domaine des modèles de culture et de systèmes de culture, différents types de programmation sont utilisés :

- classique en basique, Fortran, C (STICS ; Brisson et al. 1998, DSSAT ; Jones et al., 2003),
- objet en C++, java (CROPSYST ; Stöckle et al., 2003),
- système Multi Agents (MAGMA-S, Guerrin 2000^{a,b}),
- plateforme intégrée pour modèle à compartiments : Stella (HPS), Vensim (Ventana System, Inc.) (WALNULCAS; van Noordwijk et Lusiana, 2002).

Chacun de ces types de programmation présente des avantages et des inconvénients, la programmation classique et objet permettant d'avoir un formalisme qui permet une réutilisation aisée des modules développés. Si ce type de programmation permet de surcroît d'optimiser les temps de calcul, le développement avec ce type de langage reste relativement long. La programmation par 'Système Multi Agents' autorise des approches spatiales et décisionnelles très intéressantes mais elle n'est cependant pas la plus adaptée pour modéliser des phénomènes biophysiques complexes.

1.3. Méthodologie d'agrégation des savoirs

Les recherches effectuées sur les systèmes de culture en général et sur les systèmes à base de bananiers en particulier ont généré un grand nombre de savoirs qui prennent différentes formes. Il s'agit de la connaissance des mécanismes physiques, chimiques ou biologiques dans les systèmes considérés, de la quantification de ces processus ou de la connaissance de savoir-faire, de pratiques culturelles et de leurs impacts sur la culture dans un environnement

biophysique, socioculturel et économique donné. L'agrégation de ces connaissances signifie dans un premier temps leur formalisation et dans un second temps leur mise en cohérence. Il est possible de différencier un type d'agrégation non fonctionnelle, c'est-à-dire qui vise à décrire de manière complète le fonctionnement d'un système et d'émettre des hypothèses d'évolution, et un type d'agrégation fonctionnelle qui vise à mettre en équation et en relation les différents phénomènes au sein d'un modèle. C'est l'approche fonctionnelle qui a ici été retenue. Les modèles présentent l'avantage d'être des outils prospectifs intéressants et permettent de traiter les aspects dynamiques. De par leur nature, les modèles permettent également d'explorer, dans la limite de leur gamme de validité, des situations complexes non prévisibles de manière triviale. De plus le fait d'appréhender l'aspect dynamique des phénomènes ayant lieu au sein des systèmes de culture est également déterminant pour l'aide à leur conception.

Dans le cas de l'agrégation fonctionnelle par modèle, il s'agit de réaliser successivement :

- la description des mécanismes par des équations,
- leur quantification par la calibration des paramètres,
- la relation générale entre les phénomènes par les interactions entre équations.

L'agrégation des connaissances sur les techniques culturales et leurs effets sur la plante et l'environnement se fait dans la manière dont elles sont prises en compte (règles de décision) et évaluées.

2. La croissance et le développement du bananier

La croissance de l'appareil végétatif et reproducteur a été étudiée en détail depuis de nombreuses années. Les recherches les plus récentes concernent l'étude des mécanismes de l'élaboration du rendement (Jannoyer, 1995), de la formation et de la maturation des fruits (Julien, 2001) ou de la croissance de l'appareil racinaire (Lecomte, 2002). Malgré ces connaissances récentes aucun modèle de culture n'a jamais été développé sur cette plante particulière. Bien que le modèle STICS (Brisson et al., 1998) ait été partiellement paramétré pour le bananier aux Antilles (Brisson et al., 1997), il ne permet de simuler qu'un seul cycle de culture et considère une plante moyenne ce qui n'est pas satisfaisant pour l'étude de cette culture ou le peuplement devient hétérogène après plusieurs cycles.

Notre objectif n'est pas de développer un modèle écophysiologique mais de prendre en compte la plante de manière simplifiée de manière à décrire les dynamiques du système simulé ainsi qu'un ordre de grandeur du rendement, le tout en relation avec les pratiques culturales et le milieu.

Morphologie du bananier

Le schéma général d'un bananier (**Figure II-1**) présente les différentes parties des appareils végétatif et reproducteur. La croissance aérienne résulte du développement d'un méristème unique qui va initier toutes les feuilles (une quarantaine) et l'appareil reproducteur. Ce sont les bases des pétioles des feuilles qui vont former le pseudo-tronc (enchevêtrement de gaines).

Développement général de la plante

Le développement du bananier est caractérisé par l'émission d'une succession de feuilles régulée par l'activité du méristème végétatif (Ganry, 1980^a). La transformation de ce méristème en méristème floral marque la fin de la phase d'émission des primordia foliaires (Ram et al., 1962). L'inflorescence initiée au sommet du bulbe émerge au sommet de la plante au bout de 2 mois (entre temps 11 feuilles déjà préformées seront émises ; Ganry, 1980^a). L'inflorescence est composée de fleurs femelles à croissance ovarienne parthénocarpique qui donneront les fruits et de fleurs mâles qui dégénèrent rapidement. Après une phase de croissance en longueur (environ 1 mois) les fleurs femelles entrent en phase de remplissage jusqu'à la récolte du régime (Lassoudière et Maubert, 1971). Le pied entre alors en phase de sénescence et il est généralement sectionné. Un nouveau cycle peut alors commencer à partir d'un rejet sélectionné à la base de celui-ci.

Au delà de ce développement individuel, le peuplement de bananiers d'une parcelle cultivée est caractérisé par sa désynchronisation progressive au cours du temps. Chaque bananier se développant à son propre rythme, le peuplement synchronisé après la plantation devient désynchronisé après quelques cycles de culture. Ainsi, après 3 ou 4 années de production il est possible de trouver sur la parcelle tous les stades possibles de bananiers et donc de récolter des régimes toute l'année. Cette désynchronisation est aussi bien due à des phénomènes physiologiques (étalement de la floraison au cours du temps) que liée aux pratiques culturales (sélection du rejet successeur) ces 2 phénomènes se cumulant à chaque cycle. La pratique de

sélection du rejet successeur de chaque bananier appelée 'œilletonnage' influence de manière importante la désynchronisation du peuplement de bananiers. Suivant les critères de sélection du rejet successeur la désynchronisation sera plus ou moins tardive.

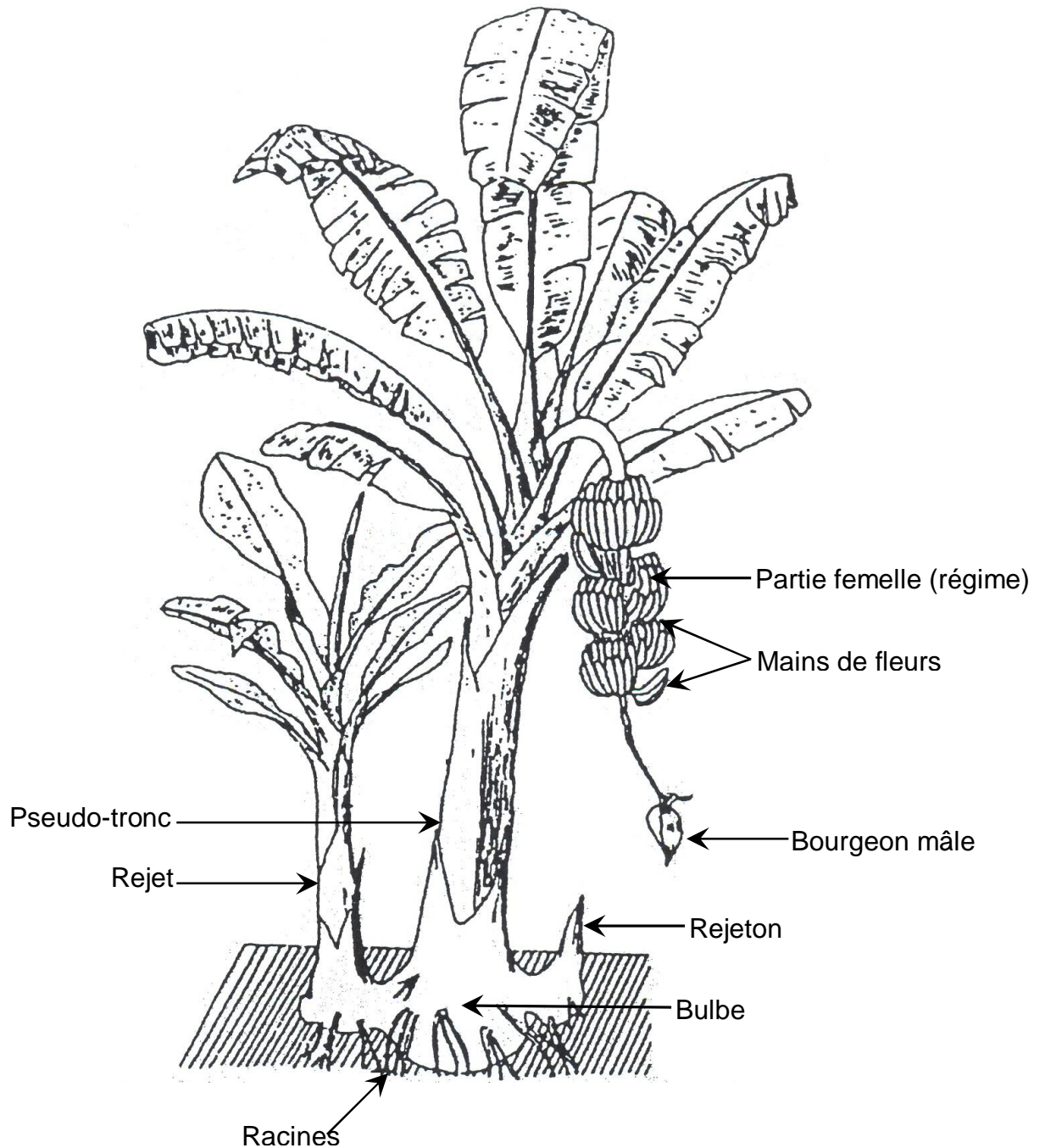


Figure II-1. Le bananier (d'après Champion, 1963)

Croissance aérienne de l'appareil végétatif

La biomasse aérienne est constituée du pseudo-tronc (gainés foliaires) et des limbes foliaires. Ces deux éléments sont de part leur nature en étroite corrélation. Le pseudo-tronc constitue un bon indicateur de l'état végétatif de la plante. La taille et la circonférence du pseudo-tronc lors du premier cycle est inférieure à celle des cycles suivants (Lassoudière, 1978). En premier cycle, la croissance est plutôt lente en début de cycle puis relativement constante. Pour les cycles suivants la croissance est relativement lente en début et en fin de cycle et relativement constante en milieu de cycle. Cette dynamique s'explique en partie par la présence d'une inhibition assurée par le pied-mère en début de cycle (Lassoudière, 1979^d). Dans les deux cas une courbe de type sigmoïdale décrit bien cette dynamique au cours du temps, avec une vitesse d'accroissement maximale entre 1,5 mois après la plantation et 1 mois avant la floraison (Martin-Prével et Montagut, 1966).

De manière générale la température, la concentration en CO₂ et le rayonnement ont une action sur le développement du bananier, aussi bien sur pour les premières phases du développement (Navarro et al. 1994 ; Turner, 1998) que sur la physiologie foliaire et le rendement final (Israeli et al. 1996).

Action de la température sur la croissance aérienne

L'action de la température sur le développement du système foliaire a été démontrée par plusieurs auteurs (Ganry, 1973 ; Ganry et Meyer 1975 ; Turner et Lahav, 1983). La température minimale en dessous de laquelle la plante ne se développe plus a été mise en évidence par Turner (1994) qui considère qu'elle est comprise entre 10 et 14°C. La valeur de 14°C est couramment retenue. De plus Turner (1994) montre que suivant la température la plante favorise plus l'accumulation de biomasse (température autour de 21°C) ou l'accélération du rythme foliaire (température autour de 30°C). La température est utilisée dans diverses approches de modélisation du rythme d'émission foliaire (Allen et al., 1988 ; Mekwatanakarn 1987 ; Mekwatanakarn et Turner, 1989).

En plus des variations entre cultivars (Stover, 1984 ; Thomas et al. 1998 ; Turner et Hunt, 1983), d'autres facteurs sont susceptibles d'intervenir conjointement avec la température dans le développement du bananier. Ganry (1977) montre qu'en phase de pré-floraison la

croissance est plus rapide qu'en phase de post-floraison. Stover (1984) montre l'importance des facteurs édaphiques avec une grande importance de la teneur en argile.

Appareil reproducteur

La biomasse du régime est dépendante du nombre de fruits du régime et du poids moyen des fruits. Ganry (1980) et Jannoyer (1995) ont montré que le nombre d'organes reproducteurs dépend du potentiel de croissance de la plante lors du virage floral (biomasse, LAI). Jannoyer (1995) a également montré que le rayonnement au moment de l'initiation florale et la nutrition azotée influencent sur le nombre de fruits du régime. Le poids moyen des fruits du régime dépend du nombre de cellules de la pulpe et de la vitesse de remplissage des cellules (Julien, 2000). Le nombre de cellules de la pulpe s'élabore durant le mois qui suit la sortie de l'inflorescence. Il dépendrait de facteurs tels que la température et la disponibilité en assimilats. Lassoudière (1978^a) a montré que la longueur externe des fruits suit au cours du temps une croissance de type sigmoïdale avec une vitesse d'accroissement maximale entre 1,5 mois après la plantation et 1 mois avant la floraison.

Le système souterrain

L'appareil souterrain du bananier est constitué d'un rhizome à partir duquel sont émis les racines et les parties aériennes. Ce rhizome comporte plusieurs méristèmes présentant des âges différents (Price, 1995). Le développement successif de ces différents méristèmes permet d'assurer la production de rejets et donc la reproduction végétative du bananier.

Le système racinaire joue deux rôles, celui d'ancrage et celui de prélèvement d'eau et d'éléments minéraux dans le sol. Il est constitué de racines primaires de diamètre de 5 à 10 millimètres et atteignent 5 à 10 mètres (Beugnon et Champion, 1966) et de racines latérales de diamètre plus petit. Les racines ne sont émises que pendant la phase de préfloraison par vagues (Lavigne, 1987 ; Gousseland et Lavigne, 1984). La structure du sol est susceptible de modifier l'architecture et la biomasse racinaire (Dorel, 2001 ; Lecomte, 2002).

Le stress hydrique

Bien que la bananier soit une plante ayant une forte teneur en eau (environ $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) l'eau consommée est principalement destinée à l'évapotranspiration, en effet le flux d'eau journalier peu varier de $30 \text{ à } 60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ (Lassoudière, 1978^{ab} ; Aubert, 1968).

De nombreux auteurs ont mis en évidence l'effet d'un déficit hydrique sur les composantes du rendement (Goenaga et Irizarry, 1998 ; Asoegwu et Obiefuna, 1987 ; Robinson et Bower, 1987 ; Robinson et Alberts, 1987 ; Holder et Gumbs, 1982), Turner et Thomas (1998a,b) montrent plus particulièrement l'influence du potentiel hydrique du sol et de la plante sur les échanges gazeux au niveau foliaire par le biais d'une corrélation entre le potentiel hydrique racines et les échanges de gaz. Young et al. (1985) établissent une relation entre le rendement et l'évapotranspiration cumulée sur l'ensemble du cycle de culture. En Guadeloupe le risque de stress hydrique est étroitement lié à la zone pédoclimatique (Meyer et Schoch, 1976 ; Dorel et Ozier-Lafontaine, 1998). Le risque est minimal en altitude et maximal en plaine. Pour une demande climatique donnée, la demande en eau est proportionnelle à la surface foliaire (Santana et al., 1993).

Le stress de nutrition minérale

La nutrition minérale joue un rôle majeur dans la croissance du bananier. L'optimum minéral et la balance des ions ont été étudiés par Du Plessi (1987). Le pH, le rapport Mg/Ca et la teneur en Mg échangeable influent sur la croissance du bananier et le rendement (Godefroy et al., 1978). L'absorption d'éléments minéraux est à mettre en relation avec l'accroissement de biomasse et suit donc des dynamiques similaires (Montagut et Marti-Prével, 1965). La quantité d'éléments minéraux immobilisés par une bananeraie est présentée dans le **tableau II-4** d'après Lahav (1995).

Tableau II-2. Quantité moyenne d'éléments minéraux immobilisée ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) par une bananeraie (2500 pieds par hectare et rendement de 50 tonnes par hectare) (d'après Lahav, 1995).

Eléments	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl	Na	Mn	Fe	Zn	B	Cu	Al
Total	388	52	1438	227	125	73	525	10,6	12,5	5,9	4,7	1,27	0,37	2,2
Fruits	189	29	778	101	49	23	75	1,6	0,5	0,9	0,5	0,7	0,2	0,2

Le stress parasitaire

La monoculture de bananiers amène le développement de parasites. Le parasitisme tellurique dû aux nématodes phytoparasites et à des champignon parasites (*cylandrocladium spp* (Loridat, 1989) forme un véritable complexe parasitaire du système racinaire. Les nématodes impliqués sont principalement *Radopholus similis* (Gowen et Quénéhervé, 1990) qui est le plus néfaste mais également dans une moindre mesure les espèces *Helicotylenchus multicinctus*, *Meloïdogyne spp*, *Pratylenchus goodeyi* et *Pratylenchus coffeae*. *Radopholus similis*, s'alimente à partir du contenu cytoplasmique des cellules du cortex de la racine et migre d'une cellule à l'autre. Sa progression dans la racine donne naissance à des cavités provoquant la formation de nécrose caractéristique de couleur lie-de-vin. Ces nécroses se limitent au cortex et n'affectent généralement pas les autres tissus de la stèle (Sarah, 1999).

Ce complexe parasitaire altère fortement la fonction d'ancrage du système racinaire et provoque la chute des bananiers. Les nécroses sur les racines diminuent la fonction de prélèvement de l'eau et des éléments minéraux du bananier ce qui a pour conséquence une réduction de la croissance. L'hypothèse d'une action hormonale est avancée par certains auteurs (Seinhorst, 1981). C'est cependant la chute des bananiers qui engendre les plus fortes pertes de rendement.

Le stress lié à la structure du sol

La présence dans le sol de structures compactées et continues conduit à une limitation du volume de sol exploré. Ceci a principalement été observé dans les vieilles bananeraies mécanisées (Delvaux et Guyot, 1989 ; Dorel 1991). Au contraire un sol meuble est favorable au développement des racines de bananiers (Champion et Sioussaram, 1970). Un sol compacté n'est pas optimum pour l'alimentation hydrique du bananier en période sèche et provoque des risques d'anoxie en cas d'excès d'eau (Lassoudière, 1971^a). La compaction engendre des perturbations dans l'absorption des éléments minéraux (azote, phosphore, potassium) et peut engendrer une absorption massive de magnésium (Dorel, 1993).

3. Conséquence sur le choix du modèle de simulation des systèmes de culture bananiers SIMBA

Pour répondre à notre problématique, les outils à développer doivent répondre à certaines exigences. L'adéquation entre les objectifs et la nature et la précision des sorties est un point central dans le choix de ces outils. Dans le cas de la conception de systèmes de culture innovants et plus durables sur des critères agronomiques, économiques et environnementaux, il est nécessaire de :

- disposer de sorties agronomiques, économiques et environnementales,
- simuler le système sur le long terme et donc de prendre en compte la dynamique spécifique de la culture à ce pas de temps,
- simuler des itinéraires techniques complexes faisant intervenir une composante décisionnelle,
- prendre en compte les spécificités des systèmes de culture étudiés. Dans notre cas, la désynchronisation du peuplement de bananiers et le rôle important des nématodes phytoparasites sont déterminants.

L'élaboration d'un modèle spécifique à cette situation et visant précisément au 'prototypage' de système de culture a donc été développée. Ce modèle s'appelle SIMBA. La démarche a été possible car elle repose sur :

- un grand nombre de données agronomiques et biophysiques accumulées par la recherche, en particulier celles conduites par le CIRAD,
- une collaboration avec des experts dans les disciplines impliquées (agronomie, science du sol et environnement, phytopathologie...).

La construction d'un outil qui allie une prise en compte des spécificités des systèmes étudiés et des sorties en adéquation avec les objectifs est donc mise en œuvre. Cette démarche va nécessiter le développement d'approches de modélisation originales.

Le **tableau II-2** présente les objectifs spécifiques de la démarche de conception de systèmes de culture à base de bananiers ainsi que les outils originaux développés et utilisés pour y parvenir.

Tableau II-2. Présentation des objectifs de la démarche de conception de systèmes de culture et des outils spécifiques.

Objectifs	Outils développés
Simulation à long terme du peuplement d'une bananeraie à la base des dynamiques du système	Modèle de simulation de la structure du peuplement SIMBA-POP
Evaluation environnementale	Indicateurs dynamiques d'évaluation des risques environnementaux Rpest, Rero
Prise en compte de la composante parasitaire	Modèle de simulation de la dynamique des nématodes phytoparasites SIMBA-NEM
Prise en compte de l'itinéraire technique par des règles de décisions	Centre décisionnel pilotant le système simulé
Prise en compte des rotations et simulation à long terme	Module de gestion des rotations et des états initiaux

Ces outils sont agencés au sein d'un modèle global appelé SIMBA de représentation (simulation), d'évaluation et de pilotage des systèmes simulés. La structure de SIMBA est présentée sur la **figure II-2** qui montre schématiquement les différents compartiments développés et leurs liaisons. Différents modules en interaction simulent les phénomènes biophysiques. Ces modules sont pilotés par un centre décisionnel qui suit un calendrier d'actes cultureux ou décide des actes cultureux à effectuer en fonctions de règles de décision. Une série d'indicateurs a été développée afin d'évaluer les principaux risques environnementaux liés à ces systèmes. Ces indicateurs intègrent les sorties des différents modules biophysiques. Un module de génération de système de culture et un module d'analyse multicritère permettent de trier les systèmes de culture simulés selon des points de vue définis.

En matière de programmation, l'option qui a été retenue pour la construction de SIMBA est d'utiliser la plateforme de programmation Stella (STELLA® software environment de High Performance System ®, Lebanon, NH, USA) qui permet de favoriser :

- la rapidité de construction,
- le côté didactique d'une telle plateforme,
- la capacité à traiter les aspects dynamiques.

Ces caractéristiques sont cohérentes avec le cahier des charges fixé : développement rapide d'un outil de simulation global et diffusion des modèles développés. Certaines fonctionnalités ne sont cependant pas possibles dans l'environnement Stella, comme la possibilité d'utiliser des modules de traitement statistique déjà existants. Ce désavantage a été partiellement résolu par le développement de modules permettant l'ajustement de paramètres module par module

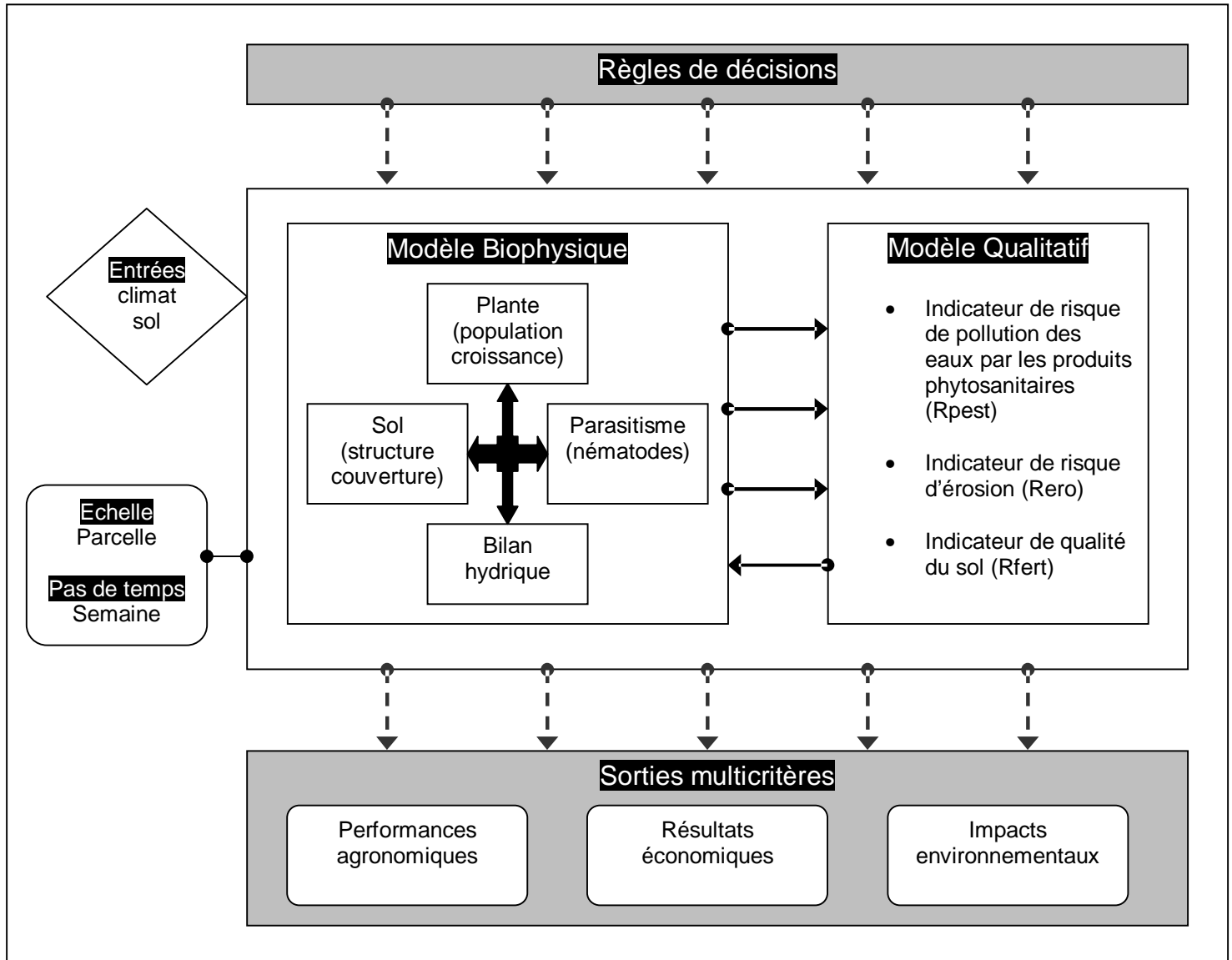


Figure II-2. Structure générale de SIMBA (entrées biophysiques, entrées décisionnelles, modèle biophysique et qualitatif, sorties multicritères).

4. Les modules de SIMBA

La **figure II-3** présente les différents modules de SIMBA ainsi que leurs connexions. La capacité de SIMBA à simuler la dynamique du peuplement de bananiers de la parcelle simulée est un des points centraux qui structure l'ensemble du travail. En effet comme nous l'avons vu, chaque individu (bananier) se développe à son propre rythme, sur une parcelle cultivée. Le bananier peut être considéré comme une plante semi-pérenne. Ceci a pour conséquence le passage du peuplement d'un état synchronisé (après la plantation) à un état

désynchronisé (après quelques cycles de culture). Cette originalité implique une structure adaptée des autres modules et notamment du module de croissance qui doit être capable de gérer la croissance d'un peuplement hétérogène et non d'une plante moyenne. Les principales innovations en terme de modélisation d'une culture ont été réalisées à ce niveau. Un autre point important est la simulation de la dynamique parasitaire qui n'est presque jamais prise en compte par les modèles de culture existants.

4.1. Les plantes cultivées

SIMBA est un modèle dont l'objectif principal est de simuler les systèmes de culture à base de bananiers. Le bananier est donc la plante principale simulée. Cependant, les rotations culturales sont une des pistes pour concevoir de nouveaux systèmes de culture. SIMBA doit donc pouvoir prendre en compte des cultures autres que le bananier, ceci étant un élément important pour le test des scénarios de rotation. La solution la plus simple consiste à prendre en compte le précédent cultural par le biais d'un état initial à la simulation de la fraction 'bananière' du système de culture. La seconde méthode consiste à simuler les plantes de rotation. SIMBA permet l'emploi de ces deux méthodes bien que seule la première soit utilisée ici. Dans le cas de la rotation avec la canne à sucre, SIMBA simule la croissance de cette plante. Nous présenterons dans le détail la simulation du bananier, d'une manière simplifiée la simulation de la canne à sucre et pour finir nous présenterons les possibilités de SIMBA pour gérer d'autres plantes de rotation.

4.1.1. La dynamique d'un peuplement de bananiers

4.1.1.1. Concepts et structure de SIMBA-POP (article)

La simulation d'un peuplement et non d'une plante moyenne est un des concepts importants dans la simulation à long terme des systèmes de culture bananiers. C'est cette dynamique des populations de bananiers sur une parcelle qui explique en grande partie les dynamiques du système (récolte, restitution de résidus, parasites, eau dans le sol,...). L'article suivant présente en détail les concepts, la structure, la calibration, la validation ainsi que des exemples d'utilisation du module SIMBA-POP.

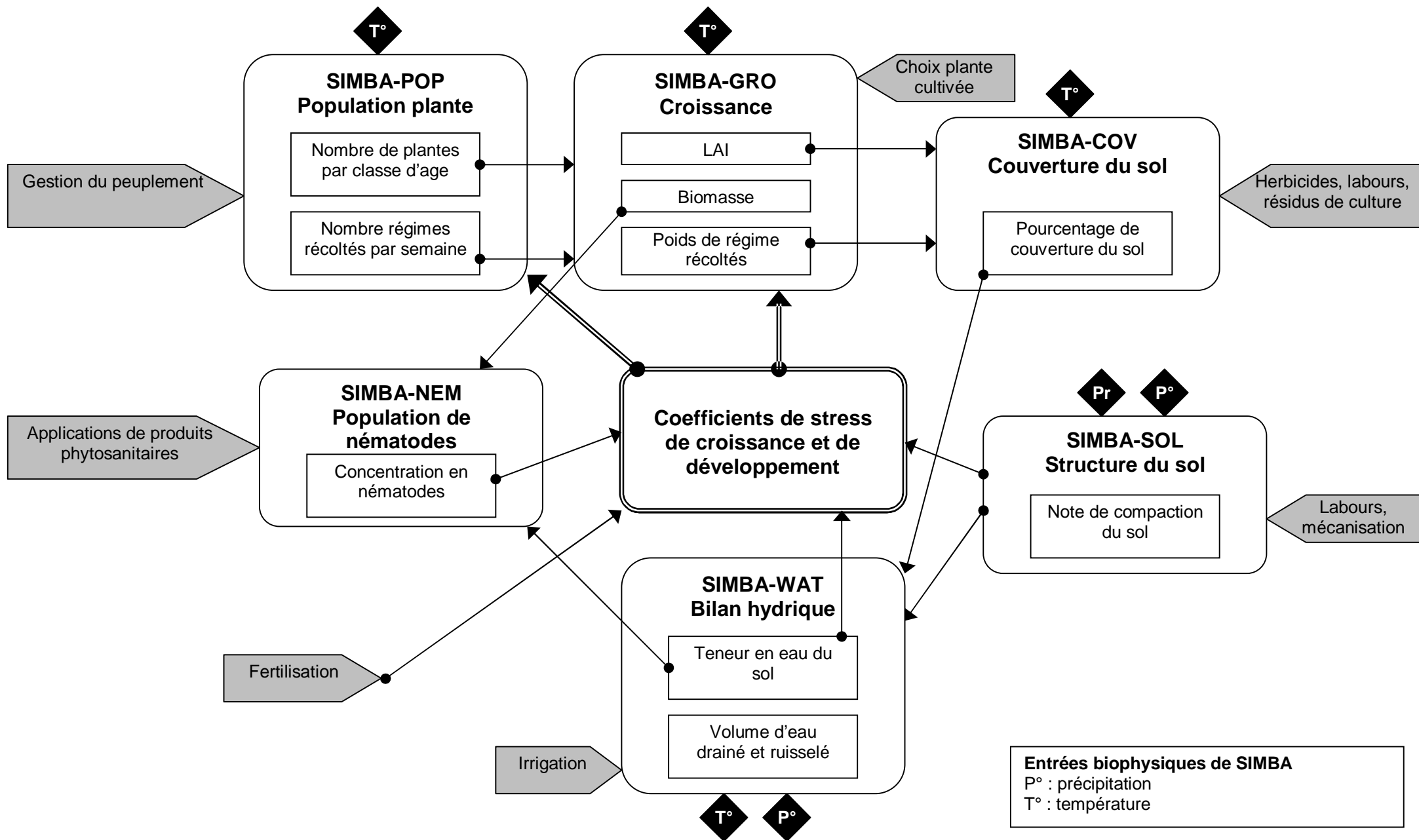


Figure II-3. Schéma des modules biophysiques de SIMBA (entrées, sorties, interactions et lieux d'action des principales pratiques culturales).

Article paru dans *Ecological Modelling* en 2004 (*Ecol. Model.* 180, 407-417).

**SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop
harvest**

Tixier¹ P., Malezieux² E., Dorel¹ M.

1- CIRAD-Flhor, UMR SYSTEM, 97130 Capesterre – Guadeloupe, French West Indies,
France

Tel: + 33 (0)5 90 41 36 87

Fax: + 33 (0)5 90 86 80 77

E-mail address: tixier@cirad.fr; dorel@cirad.fr

2- CIRAD-DS, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier cedex 5, France.

Tel: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

Corresponding address

CIRAD-DS, UMR SYSTEM, TA179/01,

34398 Montpellier cedex 5, France

Tel: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr (E. Malézieux)

Abstract

Banana crops represent a collection of individual plants that vegetatively propagate at their own rhythm, with stabilised but unsynchronised production of inflorescences over time. Such agrosystems cannot be simulated with existing crop models due to the unsynchronized behavior of individual plants. A new simulation model (SIMBA-POP), based on the cohort population concept, was built to predict phenological patterns of the population and harvest dynamics in banana cropping systems. The model was calibrated and validated for *Musa* spp.,

AAA group, cv. Cavendish Grande Naine with field data from the French West Indies (Guadeloupe and Martinique). It can quite accurately predict temporally-varying banana harvesting dynamics (date and number of harvested bunches). The harvesting peak is predicted with a precision less than 3 weeks for the first 3 cropping cycles. The model structure is based on two linear chains of cohorts characterized by both physiological age (heat unit accumulation) and development-stage dispersion in the banana population due to flowering, harvesting and sucker selection. This model is a valuable tool for both farmers (field management) and crop scientists (to simulate and design cropping systems). This approach is a first step towards long-term simulation in non-synchronized agrosystems that cannot be simulated with existing crop models.

Key words: banana, cohort population model, harvest prediction, simulation

1. Introduction

Crop models are now commonly used to simulate biomass and yields on a field scale for a variety of crops. They are implemented for a range of applications, e.g. research, crop management, and policy support. Crop growth models of the CERES (Jones et al., 2003), APSIM (Keating et al., 2003) or STICS (Brisson et al., 1998) family are well adapted for simulating development and growth in homogeneous annual crop populations. However, they are unsuitable for the simulation of complex, multispecific or multiannual cropping systems that require consideration and simulation of plant individual asynchronism that can occur and increase with time. Tree population structure, forest stages or the variation of the number of trees in a forest can be simulated using individual based models (Philipps and al., 2002), markov chain models (benabdella and al., 2003) or malthus extinction models (Karev, 2003). In complex conditions, which are common in perennial and/or multicrop systems, specific tools have to be built to predict yields and/or crop–environment relationships.

Bananas and plantains are rhizomatous herbs whose terminal bud produces the inflorescence. Each plant successively produces a series of bunches, each from a lateral shoot. The sequence can be repeated for 1 to 50 generations or more, which means that it can be considered as perennial (Turner, 1994). The main developmental stages of banana plants include sucker appearance, growth, flowering and harvest (Fig. 1). Banana crops represent a collection of individual plants derived from vegetative propagules. They develop at their own rhythm and

do not follow a synchronous cycle. Hence, at any given time, a banana crop consists of a population of individual plants at various developmental stages.

The heterogeneity in the field population structure is due to both physiological phenomena (interplant variations in planting to flowering duration, in sucker emergence, death of plants and farmers' practices (type of selected sucker, moment of selection and replacement of plants). In the literature, sucker emergence and flowering distribution in a field have been described as log-normal distributions (Fig. 1) (Ganry, 1978; Lassoudière, 1979a,b,c, 1980; Cottin, 1987). The asymmetry of the flowering distribution may be linked to different factors such as spatial heterogeneity in the field, farming practices or plant stresses (drought, root parasitism, plant nutrition, etc.). Systems under stress may have a temporally spread flowering distribution. The earliness of the “follower” (sucker of the following cycle) may vary according to the plant physiology, but the choice of follower depends on the farmer's decision criteria. The follower is chosen among existing suckers and its growth pattern depends on whether or not other shoots have been eliminated by the farmer. Growers also often replace dead or fallen plants, due to wind and poor rooting, with new planting material. Death ratio and the strategy of replacement also determine the heterogeneity in the population structure.

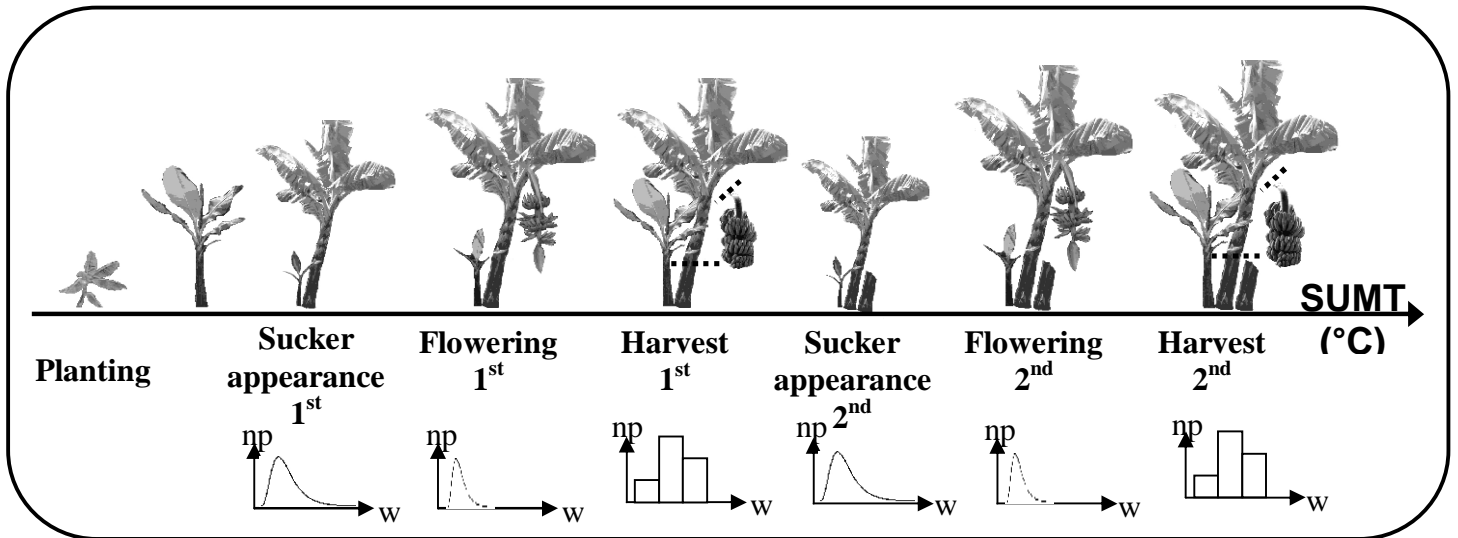


Fig. 1. Development stages of banana plant function of SUMT (heat unit accumulated by the crop in Celcius degrees) and the 6 associated distributions expressed in the number of plants (np) per week (w) for two cropping cycles.

At the field scale, harvest dynamics (number of bunches harvested per week over time) are highly dependent upon inter-plant asynchronism. Harvest dynamics are characterized by oscillations whose amplitude and frequency vary with time, climate, and farmers' practices. An example of harvest dynamics (field data and simulation) is shown for one field in Martinique (Fig. 2). Farmers may want to concentrate harvests within a short timespan in the year (requires synchronous cycles), or spread harvests throughout the year (requires asynchronous cycles). The long-term behavior of this system must be understood and effectively simulated to be able to tailor field management strategies to meet farmers' objectives. The structure of the population in a field (homogeneity vs. heterogeneity, proportion of fallen plants) determines its harvest dynamics and is one of the factors that influence farmers' decisions with respect to replanting a field (destruction of the crop, tillage). It also has a marked effect concerning on-farm labor organization. A specific representation of the system is thus needed to ensure appropriate management.

In ecology, population models are often used to simulate the evolution of plant or animal population structures over time. Systems are also often represented as a collection of stocks linked by flows (Odum and Odum, 2000). These concepts were used to build SIMBA-POP, a model aimed at describing banana population structure over time by simulating the number of bunches harvested per week in a plot. The model takes into account the main agricultural practices, such as sucker selection, that influence plant management. Banana is an ideal system to study the linkage between a population structure and plant development because of the characteristics of banana crops, e.g. half-perennial, individual plant asynchronism, and short plant cycle.

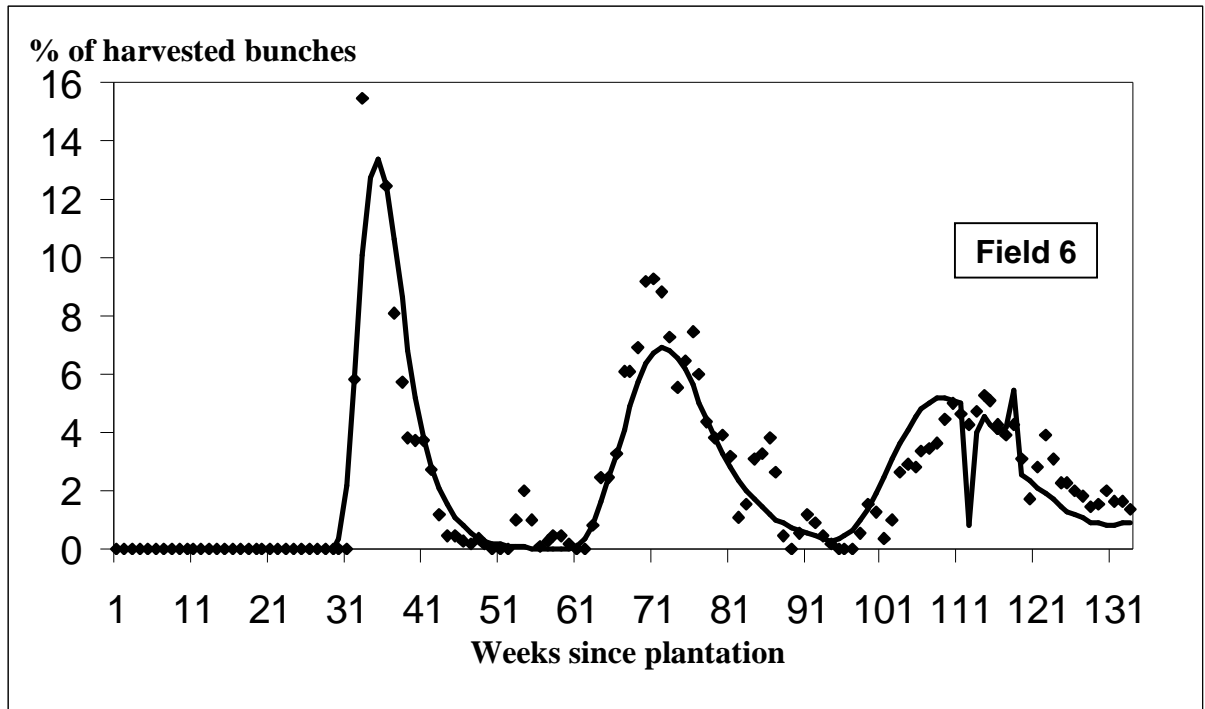


Fig. 2. Observed (♦) vs. simulated (—) harvest dynamics over time. Percentages (%) represent the ratio between the number of bunches harvested each week and the total banana crop population for field 6 (Martinique, F.W.I.; elevation: 315 meters; cultivar: *Musa* spp., AAA group, cv Cavendish Grande Naine).

2. Model structure

2.1 The cohort population dynamics concept

A cohort can be define as a group of individuals characterized by the same phenological stage (Deaton and Winebrake, 2000). It is an appropriate unit for analyzing demographic processes in a population. A cohort chain is a group of cohorts linked to each other by flows controlled by various processes or laws (physiological, stochastic, etc.). The cohort population dynamics concept is commonly used in ecology to simulate animal population dynamics at different stages, e.g. insects (Castañera et al. 2003; Cross, and Crook, 1999; Hannon and Matthias, 1999). This concept was rarely used to represent vegetal systems (Goudriaan and van Roermund, 1989). We used it to simulate banana population dynamics. Cohort chains enable simulation of successive physiological stages of banana plant development, i.e. corm growth, inflorescence initiation, sucker emission, bunch harvest, and death of the main stem. These

phenological stages can be assimilated by analogy with processes of birth, reproduction, and death. Unlike existing banana models based on the mean plant concept (Mekwatanakarn, 1987), the cohort structure is well adapted for describing population dynamics in a banana field, where a cohort represents the number of individuals at a developmental stage for a given week. To be realistic, the model also has to take various environmental factors and agricultural practices that interact with the crop population and its development into account. The model presented here called SIMBA-POP, only includes the population dynamics and the main agricultural practices related to management of the population, such as sucker selection or plant replacement.

It simulates the dynamics of a banana plant population in a plot over numerous crop cycles. The main output is the number of bunches harvested per week over time. As for many plants, phenological stages are described by the accumulation of heat units that determine their durations (Bonhomme, 2000). The physiological development threshold of a banana plant was determined to be 14°C (Ganry and Meyer, 1975; Ganry, 1980; Turner and Lahav, 1983; Turner and Hunt, 1983).

2.2 Mathematical structure

SIMBA-POP was developed using the STELLA® software environment from High Performance System ® (Lebanon, NH, USA). It runs with a weekly step (t) and is structured in two linked chains of cohorts that respectively represent the plants before flowering (pre-flowering cohort chain) and plants after flowering (post-flowering cohort chain) (Fig. 3). Variables used in SIMBA-POP are represented in Table 1. Variables refer to the whole population (X_t) or to the (i) cohort ($X_{i,t}$). The only input data of the model is the mean daily temperatures (T_d). Outputs include the number of flowering plants (FL_t) and the number of harvested plants (H_t) for each step (t). Parameters relative to plant physiology are given in Table 2.

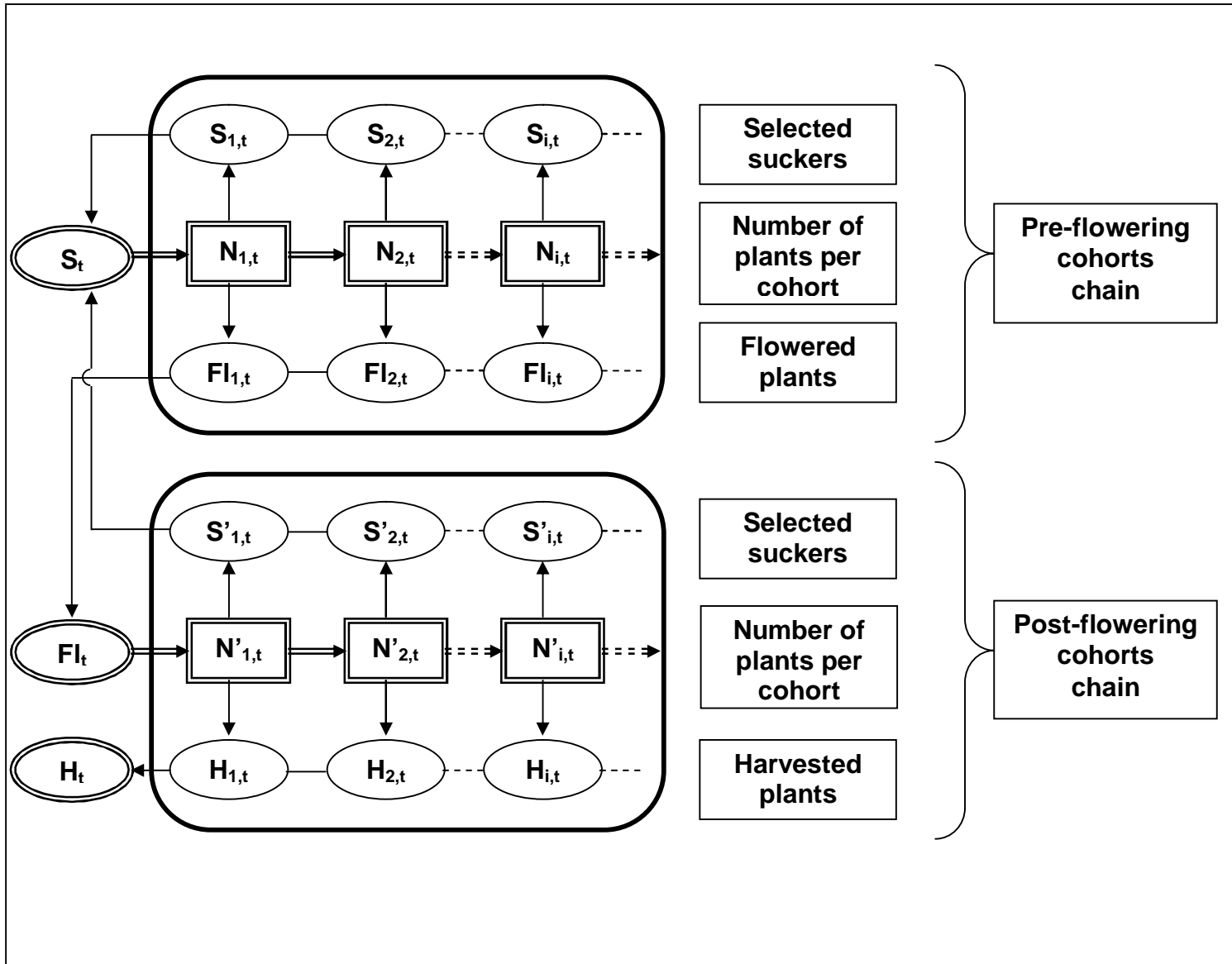


Fig. 3. The cohort structure of SIMBA-POP (refer to Table 1 for variable meaning).

Table 1 Variables used for SIMBA-POP simulation model

Input data	Definition
T_d	daily average temperature of day (d) ($^{\circ}\text{C}$)
Output variables	Definition
N_t	total number of plants in the simulated field at step (t)
$H_{i,t}$	total number of harvested plants in cohort (i) at step (t) (in the post-flowering chain)
H_t	total number of harvested plants in the simulated field at step (t)
$D_{i,t}$ and $D'_{i,t}$	total number of dead plants in cohort (i) at step (t)
D_t	total number of dead plants in the simulated field at step (t)
$S_{i,t}$ and $S'_{i,t}$	total number of suckers that appeared in cohort (i) at step (t)
S_t	total number of suckers that appeared in the simulated field at step (t)
$FL_{i,t}$	total number of plants that reached the flower stage in cohort (i) at step (t) (in pre-flowering chain)
FL_t	total number of plants that reached the flower stage in the simulated field at step (t)
R_t	total number of plants to replace
RR_t	total number of plants replaced at step (t)
$SUMT_{i,t}$	heat-units accumulated by cohort (i) at step (t) (day-degrees)
$SUMT_t$	efficient temperature at step (t) (day-degrees)
$s_{i,t}$	sucker selection rate in cohort (i) at step (t)
$WS_{i,t}$	week since 1 st week of sucker appearance when $SUMT_{i,t} >$ birth threshold
$fl_{i,t}$	flowering rate of cohort (i) at step (t)
$WF_{i,t}$	week since 1 st week of flowering when $SUMT_{i,t} >$ flowering threshold
$WH_{i,t}$	week since 1 st week of harvest when $SUMT_{i,t} >$ harvest threshold
DDT_d	daily thermal temperature of day (d) (day-degrees)

(i) is the number of the cohort in both pre-flowering and post-flowering chains

(t) is the running step of the model in weeks

(d) is the day of the simulated week

Table 2 Parameters used in SIMBA-POP

Parameters	Definition
$a_s ; b_s ; c_s$	parameters of the sucker appearance rate log-normal curve
BT	sucker appearance threshold (day-degrees)
$a_f ; b_f ; c_f$	parameters of the flowering rate log-normal curve
FT	flowering threshold (day-degrees)
$h_{i,t}$	harvesting rate in cohort (i) at step (t)
HT	harvest threshold (day-degrees)
$d_{i,t}$	death rate (falling) in cohort (i) at step (t)
r_t	replacement rate at step (t)
T_{banana}	weekly physiologically active temperature threshold of banana (°C)

(i) is the number of the cohort in both pre-flowering and post-flowering chains

(t) is the running step of the model in weeks

Eqs. 1 to 4 calculate the number of plants in each cohort (i) at each running step (t) for both the pre-flowering chain ($N_{i,t}$) and the post-flowering chain ($N'_{i,t}$). In the pre-flowering chain, at each step, the pool of the cohort ($N_{i,t}$) is transferred to the cohort ($N_{i+1,t+1}$) minus the flowered plants ($FL_{i,t}$), and the fallen and dead plants ($D_{i,t}$) (Eq. 1). In the post-flowering chain, at each step, the pool of the cohort ($N'_{i,t}$) is transferred to ($N'_{i+1,t+1}$) minus the harvested plants ($H_{i,t}$) and dead plants ($D'_{i,t}$) (Eq. 2). New selected suckers in both chains ($S_{i,t}$ and $S'_{i,t}$) are transferred to the first cohort of the pre-flowering chain, $N_{1,t}$ represents the pool of new planted and selected suckers in the plot (Eq. 3). The flowered plants ($FL_{i,t}$) are transferred to the first cohort of the post-flowering chain (Eq. 4).

$$N_{i,t} = N_{i-1,t-1} - FL_{i-1,t-1} - D_{i-1,t-1} \quad (1) \quad (\text{pre-flowering chain})$$

$$N'_{i,t} = N'_{i-1,t-1} - H_{i-1,t-1} - D'_{i-1,t-1} \quad (2) \quad (\text{post-flowering chain})$$

$$N_{1,t} = \dot{a}^n S_{i,t} + \dot{a}^n S'_{i,t} + RR_t \quad (3) \quad (\text{pre-flowering chain})$$

$$N'_{1,t} = \dot{a}^n FL_{i,t} \quad (4) \quad (\text{post-flowering chain})$$

Flowered plants ($FL_{i,t}$), harvested plants ($H_{i,t}$) and new selected suckers (S_t and S'_t) at step t are calculated in Eqs. 5, 6, 7 and 7'. The flowering rate ($fl_{i,t}$), harvesting rate ($h_{i,t}$) and new sucker selection rate ($s_{i,t}$) are calculated for each cohort in accordance with a probabilistic law

whose parameters relate to plant physiology and farmers' practices. The parameters were determined from experimental field data (see calibration).

$$\mathbf{FL}_{i,t} = \mathbf{N}_{i,t} * \mathbf{fl}_{i,t} \quad (5) \quad (\text{pre-flowering chain})$$

$$\mathbf{H}_{i,t} = \mathbf{N}_{i,t} * \mathbf{h}_{i,t} \quad (6) \quad (\text{post-flowering chain})$$

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{S}_{i,t} * \mathbf{s}_{i,t} \quad (7) \quad (\text{pre-flowering chain})$$

$$\mathbf{S}'_t = \mathbf{S}'_{i,t} * \mathbf{s}_{i,t} \quad (7') \quad (\text{post-flowering chain})$$

Fallen and dead plants for both chains ($\mathbf{D}_{i,t}$ and $\mathbf{D}'_{i,t}$) are calculated in Eqs. 8 and 8'. Falling depends on plant mass, parasitism that affect roots and wind strength. These factors are integrated in the death rate ($\mathbf{d}_{i,t}$). In the model presented here, links with other sub-models that simulate wind and root parasitism are not taken into account.

$$\mathbf{D}_{i,t} = \mathbf{N}_{i,t} * \mathbf{d}_{i,t} \quad (8) \quad (\text{pre-flowering chain})$$

$$\mathbf{D}'_{i,t} = \mathbf{N}'_{i,t} * \mathbf{d}_{i,t} \quad (8') \quad (\text{post-flowering chain})$$

The total number of plants on the plot (\mathbf{N}_t), the total number of flowered plants (\mathbf{FL}_t), new selected suckers (\mathbf{S}_t), the total number of harvested plants (\mathbf{H}_t) and fallen and dead plants (\mathbf{D}_t) are calculated for each step t in Eqs. 9 to 13, respectively.

$$\mathbf{N}_t = \dot{\mathbf{a}}^i \mathbf{N}_{i,t} + \dot{\mathbf{a}}^n \mathbf{N}'_{i,t} \quad (9) \quad (\text{whole population})$$

$$\mathbf{FL}_t = \dot{\mathbf{a}}^i \mathbf{FL}_{i,t} \quad (10) \quad (\text{whole population})$$

$$\mathbf{S}_t = \dot{\mathbf{a}}^i \mathbf{S}_{i,t} + \dot{\mathbf{a}}^n \mathbf{S}'_{i,t} \quad (11) \quad (\text{whole population})$$

$$\mathbf{H}_t = \dot{\mathbf{a}}^i \mathbf{H}_{i,t} \quad (12) \quad (\text{whole population})$$

$$\mathbf{D}_t = \dot{\mathbf{a}}^i \mathbf{D}_{i,t} + \dot{\mathbf{a}}^n \mathbf{D}'_{i,t} \quad (13) \quad (\text{whole population})$$

The number of plants to replace at step t (\mathbf{R}_t) is the sum of plants to replace at step $t-1$ and dead plants at step t , minus the replaced ones at step $t-1$ (Eq. 14). The number of replaced plants (\mathbf{RR}_t) is calculated in Eq. 15 using a replacement factor (\mathbf{r}_t) in accordance with farmers' practices (Eq. 15).

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{R}_{t-1} + \mathbf{D}_t - \mathbf{RR}_{t-1} \quad (14) \quad (\text{whole population})$$

$$\mathbf{RR}_t = \mathbf{R}_t * \mathbf{r}_t \quad (15) \quad (\text{whole population})$$

Heat-units accumulated at each step by each cohort ($SUMT_{i,t}$ in 'degree-days') are calculated in Eq. 16. Heat-units accumulated for each week ($SUMT_t$ in °C) is calculated in Eqs. 16' and 16'', where DTT_d (daily thermal time) is the number of heat-unit accumulated during one day, T_{banana} the temperature below which development is assumed to cease, and T_d the mean day temperature.

$$SUMT_{i,t} = SUMT_{i-1,t-1} + SUMT_t \quad (16) \quad (\text{whole population})$$

$$SUMT_t = S^{(d=1 \text{ to } 7)} DTT_d \quad (16') \quad (\text{whole population})$$

$$DTT_d = (T_d - T_{banana}) \quad (16'') \quad (\text{whole population})$$

2.3 Stochastic laws

Phenological stages were considered as being related to these heat units accumulated by each cohort. Flowering, sucker selection and harvest were assumed to follow a log-normal curve according to results reported by Ganry (1978), Lassoudière (1979^c), Cottin (1987). Hence, stochastic laws were used to establish the rates of flowering ($fl_{i,t}$), sucker selection ($s_{i,t}$) and harvest ($h_{i,t}$). We assumed they apply when the corresponding threshold for heat units accumulated is reached. When applied, these laws follow a log-normal curve function.

Flowering occurs in a cohort when the heat-units accumulated is over the FT threshold. The flowering rate ($fl_{i,t}$) of the cohort (i) at step (t) follows a log-normal curve function according to the number of weeks since first flowering ($WF_{i,t}$) with a_f , b_f and c_f parameters (Eqs. 17, 17' and 17'').

$$fl_{i,t} = a_f * \exp (-0.5 ((\ln (WF_{i,t} / b_f)) / c_f)^2) \quad (17)$$

$$\text{if } SUMT_{i,t} < FT \text{ then } (WF_{i,t} = 0) \quad (17')$$

$$\text{if } SUMT_{i,t} \geq FT \text{ then } (WF_{i,t} = WF_{i-1,t-1} + 1) \quad (17'')$$

Sucker selection occurs in a cohort when the heat-units accumulated is above the BT threshold. The sucker selection rate ($s_{i,t}$) of the cohort (i) at step (t) follows a log-normal curve function according to the number of weeks since first sucker selection ($WS_{i,t}$), with a_s , b_s and c_s parameters (Eqs. 18, 18' and 18'').

$$s_{i,t} = a_s * \exp (-0.5 ((\ln (WF_{i,t} / b_s)) / c_s)^2) \quad (18)$$

$$\text{if SUMT}_{i,t} < BT \text{ then } (WS_{i,t} = 0) \quad (18')$$

$$\text{if SUMT}_{i,t} \geq BT \text{ then } (WS_{i,t} = WS_{i-1,t-1} + 1) \quad (18'')$$

Harvest occurs in a cohort when the sum of accumulated heat units is above the HT threshold.

The harvesting rate ($h_{i,t}$) of the cohort (i) at step (t) follows a log-normal curve function according to the number of weeks since first flowering ($WH_{i,t}$) (Eqs. 19, 19' and 19'').

According to farmers' practices, this curve is summarized by a 3-week histogram, as described in Eq.19.

$$\text{if } (WH_{i,t} = 1 \text{ then } h_{i,t} = 0.2) \text{ else (if } WH_{i,t} = 2 \text{ then } h_{i,t} = 0.625) \text{ else (if } WH_{i,t} = 3 \text{ then } h_{i,t} = 1) \text{ else } (h_{i,t} = 0) \quad (19)$$

$$\text{if SUMT}_{i,t} < HT \text{ then } (WH_{i,t} = 0) \quad (19')$$

$$\text{if SUMT}_{i,t} \geq HT \text{ then } (WH_{i,t} = WH_{i-1,t-1} + 1) \quad (19'')$$

3. Parameter calibration and model validation

Calibration and validation data were collected in banana fields in Guadeloupe and Martinique (French West Indies). All data are presented in Table 3. Plants were grown in field conditions with Cavendish cv Grande Naine (*Musa* spp., AAA group, cv Cavendish Grande Naine) with no major stress (no hurricanes, drought or parasitism damage).

Table 3 Fields used for calibration and validation of SIMBA-POP. Number of flowered and harvested plants (*Musa* spp., AAA group, cv Cavendish Grande Naine) and temperature were recorded weekly. Fields were located in Guadeloupe (16°15'N, 61°32' W) and Martinique (14°36'N, 61°5'W), French West Indies.

Number	Island	Field name	Elevation (m)	Observation dates	Number of observed weeks
1	Martinique	HANGA	325	08/07/1997 – 19/08/2001	215
2	Martinique	MC07	350	16/06/1998 – 03/03/2002	194
3	Martinique	MJO1	325	13/05/1998 – 03/03/2002	199
4	Martinique	FPAIN	300	27/06/1996 – 05/11/2000	227
5	Martinique	LIS 2	315	20/06/1997 – 03/03/2003	297
6	Martinique	MC04	315	19/01/1995 – 27/07/1997	131
7	Guadeloupe	JARDIN	45	01/10/1996 – 19/12/2001	272
8	Martinique	DACHI	260	16/11/1995 – 17/02/2002	326
9	Martinique	FSAVA	160	30/05/1997 – 24/02/2002	247
10	Martinique	GOYAVE	290	10/06/1996 – 16/12/2001	288
11	Martinique	MC06	315	19/05/1998 – 17/02/2002	196
12	Martinique	GCHEM	340	18/10/1997 – 03/03/2002	228
13	Martinique	COMPL	335	30/10/1996 – 03/12/2000	214
14	Martinique	CVERT	295	24/04/1997 – 21/10/2001	234

3.1 Calibration

The flowering rate ($fl_{i,t}$) was fitted to a log-normal curve using flowering data for the first cycle (fields 1 to 6). The parameters are: $a_f = 0,12$; $b_f = 6.35$ and $c_f = 0.47$ (Fig. 4). The FT threshold was calibrated using the sum of heat units accumulated between planting and first flowering for fields 1 to 7. FT is 2350 degree-days (SD = 223; 7 fields).

The sucker selection rate ($s_{i,t}$) was calibrated by adjusting the sucker selection parameters to minimize the error between simulation and field data for all harvesting peaks for each calibration field. The log-normal curve parameters were calibrated for fields 1 to 7 ($a_s = 1,00$; $b_s = 3,25$ and $c_s = 0,31$, respectively). The BT threshold was calibrated using the sum of heat units accumulated between planting and first sucker appearance. BT was 2180 degree-day

(SD = 156; 7 fields). The harvest threshold HT was fixed to 900 degree-days according to data from the literature (Ganry, 1978).

The replacement rate (r_t) and death rate (d_t), which are respectively related to farmers' practices and the plant environment (wind and parasitism), were not considered or calibrated in this version of the model. Sub-models necessary to take falling and replacement into account are discussed below.

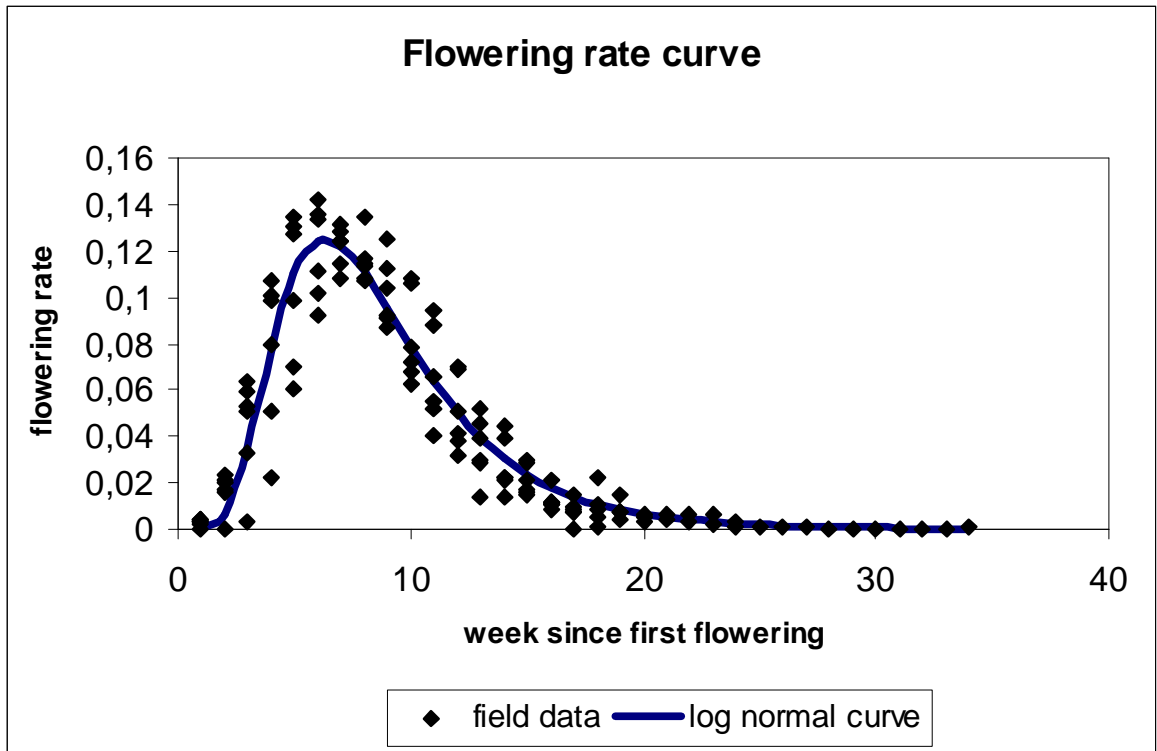


Fig. 4. Calibration of the flowering rate curve ($fl_{i,t}$) using first cycle data from fields 1 to 6 (Martinique F.W.I.), as a function of the number of weeks since the first flowering of cohort (i) at step (t) ($WF_{i,t}$).

3.2 Validation

Banana harvest dynamics at the crop scale are characterized by oscillations over time (Fig.2). The dynamic aspect of these outputs requires specific statistic tools for model validation. The predictive accuracy of the model depends on reproducing the harvest dynamics and magnitude of harvesting peaks through successive cycles. In this regard, the cumulated number of harvested plants and the capacity of the model to predict successive harvesting peak dates are suitable for long-term validation.

Simulations were run for seven plots (field 8 to 14, Table 3). Both the relation between the observed and simulated cumulated number of bunches harvested over time and the ability of the model to predict harvesting peaks (date of the maximal number of bunches harvested for each cropping cycle) were used to validate the model.

Fig. 5 shows that the model can quite accurately predict ($r^2=0.9858$; $n=1058$) the cumulated number of bunches harvested after many cycles for fields 8 to 14. The fact that the model error is distributed equally around the median curve ($Y=X$) indicates that the model does not systematically lead to underestimation or overestimation.

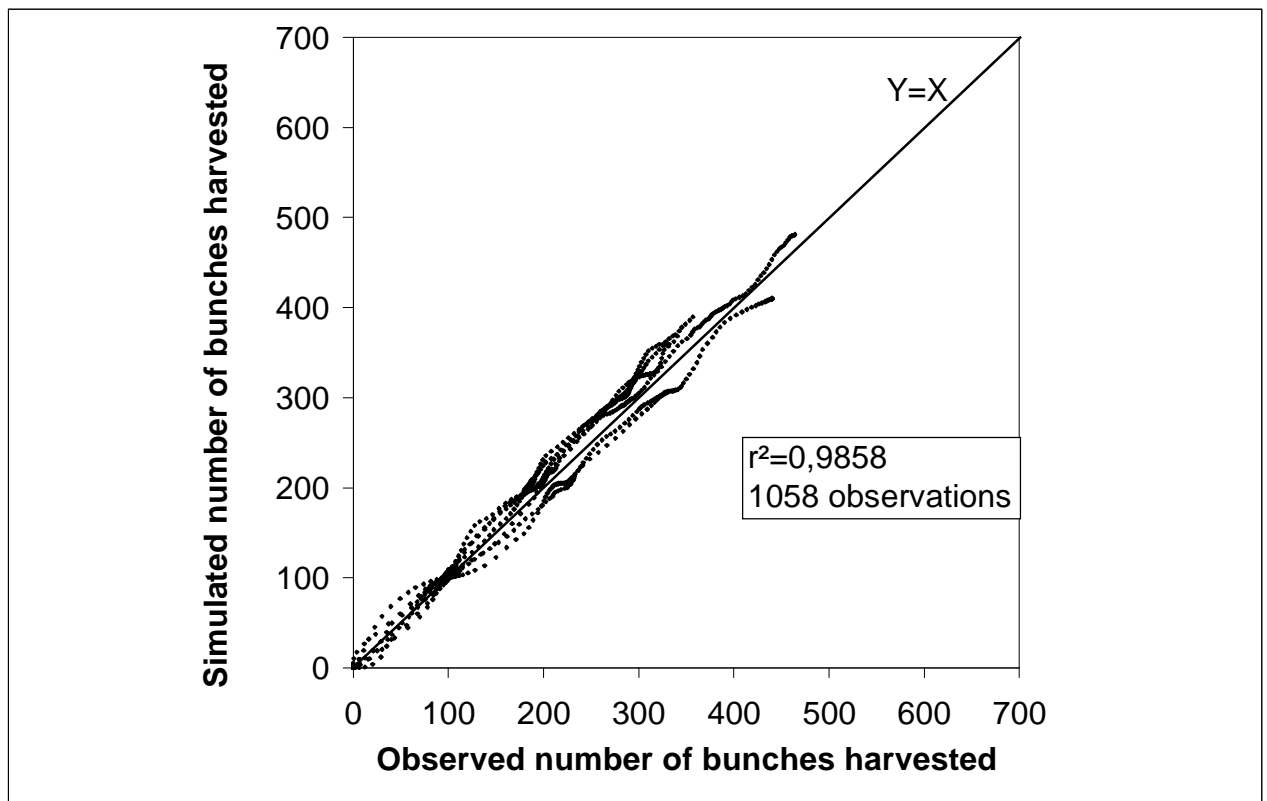


Fig. 5. Simulated vs. observed cumulated number of harvested bunches per week (%) for 7 fields (field 8 to 14; Martinique F.W.I.). R^2 was calculated using all data for the 7 fields.

Harvesting peak dates (29 harvesting peaks) were estimated for field data (8 to 14) using a log-normal curve fitting. In the log-normal equation: $F(X) = a * \exp(-0.5((\ln(X / b)) / c)^2)$, the b parameter represents the abscissa of the curve peak. Fig. 6 shows successive harvesting peaks for simulated vs. observed data.

Complementary statistic methods were used to evaluate the predictive accuracy of the model to determine harvesting peak dates. The mean deviation (MD) between observed and simulated values is a measurement of the tendency of the model to over or underestimate the observed value. MD is defined as:

$$MD = (1 / n) * (SERR_i)$$

Where $ERR_i = Y_i - X_i$ and Y_i and X_i are the i^{th} predicted and observed value, respectively, where n is the sample size. The mean predicted error (MPE) is defined as:

$$MPE = (1 / n) * (S\frac{1}{2}ERR_i^{1/2})$$

MPE is an indicator of the accuracy of the model. The mean square error of the prediction (MSEP) is a good criterion for comparing the predictive accuracy of alternative models (Wallach, 1989). MSEP is the mean squared deviation of the predicted values from the observed values:

$$MSEP = (1 / n) * (S(ERR_i)^2)$$

The root mean square error predicted (RMSEP), expressed in the same unit as the observed values (weeks), is defined as:

$$RMSEP = \sqrt{MSEP}$$

These statistics were applied to the simulated and observed harvesting peak dates. The first three harvesting peaks were taken into consideration in fields 8 to 14. Table 4 shows these validation statistic results (26 cropping cycles analyzed).

Table 4 Statistical results relative to the simulation of the harvesting peak date with SIMBA-POP.

Statistic method	All peaks	1 st cycle peak	2 nd cycle peak	3 rd cycle peak
MD	-0.38	0.29	-0.25	-1.08
MPE	1.92	0.94	2.30	1.88
MSEP	5.4	1.35	8.20	5.30
RMSEP	2.42	1.16	2.86	2.30

(MD = mean deviation; MPE = mean square error; MSEP = mean square error of the prediction; RMSEP = root mean square error predicted)

These results show that the model is able to predict the first three cycles with a relatively good accuracy. RMSEP is always less than 3 weeks and is stable over time. This confirms the ability of the model to predict the long-term harvesting peak dates. It is important to note that

even though the accuracy of the model decreases with time, less accuracy is necessary in the long term because harvesting peaks become more spread out.

4. Application of SIMBA-POP and perspectives

SIMBA-POP potentially has various applications for scientists and farmers. It may be used by scientists to evaluate different agricultural practices relative to the management of a banana population in a field. It can also be linked with other sub-models to make realistic long-term simulations of cropping system performance. SIMBA-POP can also be used as a predictive tool for farmers to optimize practices and be a powerful tool for long-term management (labour per cycle, harvesting periods, etc.).

4.1 SIMBA-POP: a tool to test and optimize population management decision criteria

SIMBA-POP can be linked with specific sub-models that simulate farmers' practices and then be used to test new population management decision criteria. In banana cropping systems, main decision criteria relative to the crop population management are sucker selection and dead (fallen) plant replacement. The sucker selection criterion is defined by a set of cropping actions geared to removing unwanted suckers and to keeping only one follower (with expected characteristics that include spatial location, shape and size). Testing a new set of parameters (sucker selection parameters) is an interesting use of the model, with the aim of potentially designing new cropping systems. Fig. 7 shows harvest dynamics for two sucker selection strategies: “synchronous cycle strategy” with narrow harvesting peaks, and “asynchronous cycle strategy” with broad and earlier harvesting peaks. The synchronous cycle strategy is based on late selection (the sucker selection BT threshold is high) and selection occurs over a short period of time (the sucker selection rate curve is narrow). In contrast, the asynchronous strategy is based on early selection (BT is small), but the selection period is temporally extended (the sucker selection rate curve is broad). In these two simulations, the sucker selection strategy affects the harvesting dynamics beyond the first cycle. SIMBA-POP can help farmers to select crop management strategies to meet their specific objectives and conduct virtual tests. For example, in choosing a planting date and sucker selection criteria to optimise benefits in relation with seasonal variations in banana market prices or labour availability. The model can help to optimise these choices throughout

many cropping cycles, not only for the first cycle and not only on the basis of empirical knowledge, as is currently done. With a link to a sub-model that controls the replacement of fallen plants criteria, SIMBA-POP can be used to test new criteria to control heterogeneity in a plot.

4.2 Perspectives: Linkage with other sub-models to simulate the whole cropping system

The population model SIMBA-POP is the first step of a larger model that aims at simulating the whole cropping system over the long-term. Simulation of the plant population structure in a field can provide very important information for assessing some environmental and agronomic variables of cropping systems. Long-term simulations of cropping systems requires linkage of population models with crop growth model. The development of such models involves some structural issues. In the case of SIMBA-POP, the double cohort chain structure allows easy linkage with growth sub-models to each sub-population (each cohort). In contrast with a model based on linear equations that describe the population structure, the cohort chain structure is flexible because all variables of each sub-population are accessible. First SIMBA-POP can be improved by taking into account the falling rate, linked to wind, parasitism and population management criteria, as described earlier. It also can be linked to plant growth, biomass and yield sub-models.

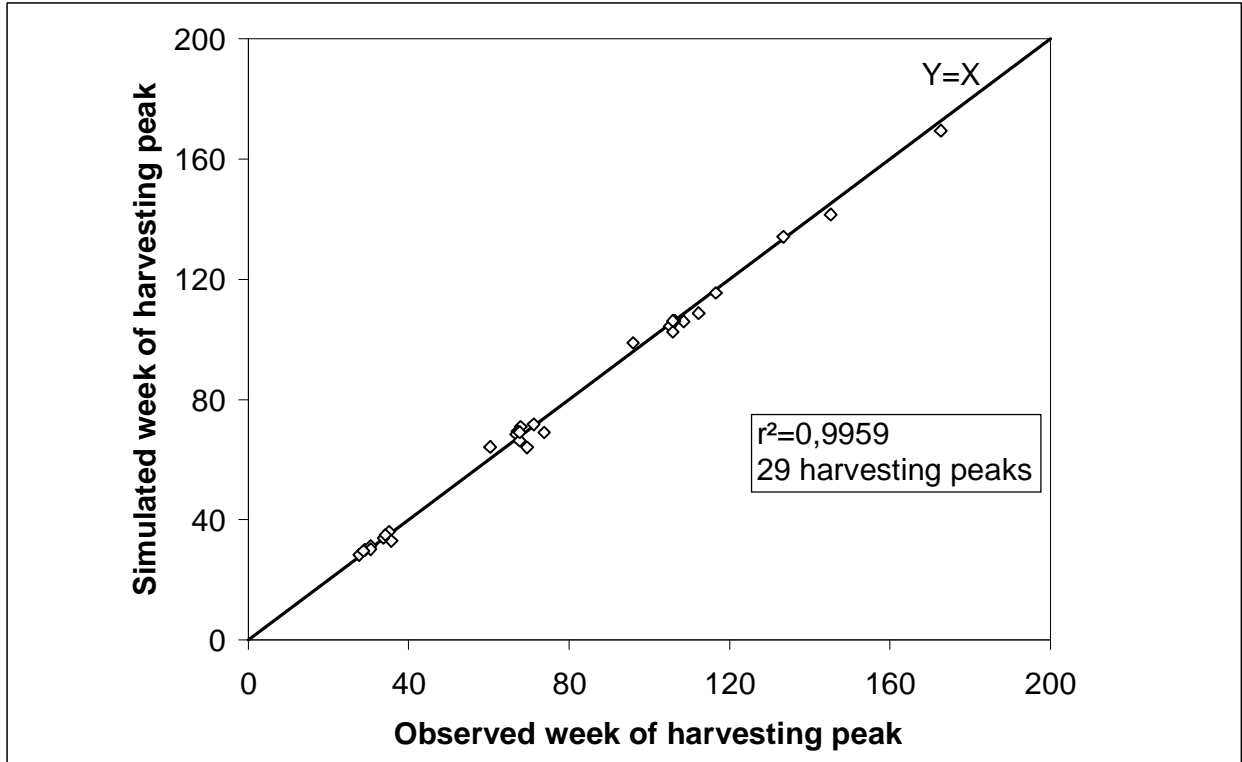


Fig. 6. Simulated vs. observed week of harvesting peaks for fields 8 to 14 (Martinique F.W.I.).

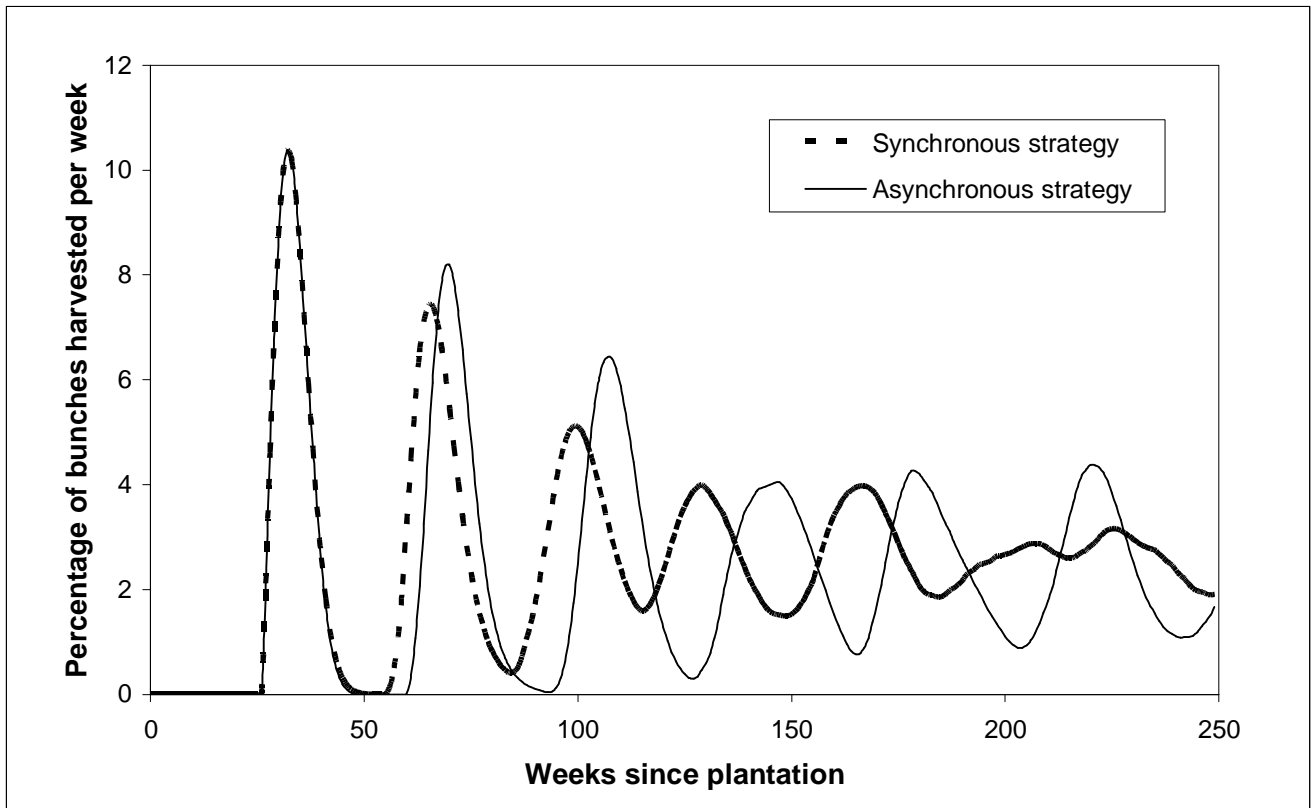


Fig. 7. Percentage of bunches harvested per week relative to the initial number of plants: $(H_t / N_{1,1}) * 100$; with H_t the total number of bunches harvested at step t and $N_{1,1}$ the number of planted plants in cohort 1 at step 1; simulated for two sucker selection strategies: “synchronous strategy” with late pruning (sucker appearance threshold BT is high) and narrow sucker selection rate curve of cohort ‘i’ at step ‘t’ ($s_{i,t}$ is low) and “asynchronous strategy” with early pruning (‘BT’ is low) and broad selection curve ($s_{i,t}$ is high).

5. Conclusion

This study highlights several aspects of SIMBA-POP, a population model based on the cohort concept. The model was successfully calibrated and validated for banana with data from Guadeloupe and Martinique. Although there are some limits under stressed situations or high falling rates, the model can be used to predict harvesting periods over cropping cycles. It also can be used to simulate or compare new population management decision criteria. This study also shows that population models are useful for long-term simulation of agrosystems with unsynchronised plants. In this case, linkage with sub-models that simulate water balance, plant growth and soil parasitism will enable realistic long-term simulation of cropping systems in the near future. This approach could be extended to systems with asynchronised population dynamics behavior, especially for perennial or half-perennial systems based on vegetative propagation.

Acknowledgements

We are particularly grateful to the farmers of Guadeloupe and Martinique that helped us to build the plant database. We would also like to thank our colleagues from CIRAD-Filhor who helped us to contact farmers and provided us with temperature data (especially André Lassoudière).

References

- Benabdella, B., Albrecht, K.F., Pomaz, V., L., Denisenko, E.,A., and Logofet, D., O., 2003. Markov chain models for forest successions in the Erzgebirge, Germany. *Ecol. Model.*, 159: 145-160.
- Bonhomme, R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' unit. *Eur. J. Agron.*, 12: 1-10.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonielli, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., and Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18: 311-346.
- Castañera, M.B., Aparicio, J.P., and Gürtler, R.E., 2003. A stage-structured stochastic model of the population dynamics of *Triatoma infestans*, the main vector of Chagas disease, *Ecol. Model.*, 162 : 33-53.

- Cottin, R., 1987. Modélisation de la production bananière. Influence de quelques paramètres en Martinique. *Fruits*, 42 (12): 691-701.
- Cross, J.V., and Crook, D.J. 1999. Predicting spring emergence of blackcurrant leaf midge (*Dasineura tetensi*) from air temperatures. *Entomologia experimentalis et applicata.*, 91: 421-430.
- Deaton, M.L., and Winebrake, J.J., 2000. Modeling mobile source air pollution inventories. In: M.L. Deaton, J.J. Winebrake (Editors). *Dynamic modeling of environmental systems*, Springer Verlag, New York, pp. 142-157.
- Ganry, J., 1978. Recherche d'une méthode d'estimation de la date de récolte du bananier à partir de données climatiques dans les conditions des Antilles. *Fruits*, 33 (10): 669-679.
- Ganry, J., 1980. Note de synthèse: Le développement du bananier en relation avec les facteurs du milieu: - Action de la température et du rayonnement d'origine solaire sur la vitesse de croissance des feuilles. - Etude du rythme de développement de la plante. *Fruits*, 35 (12): 727-744.
- Ganry, J., and Meyer, J.P., 1975. Recherche d'une loi d'action de la température sur la croissance des fruits du bananier. *Fruits*, 30(6): 375-392.
- Goudriaan, J., and van Roermund, H.J.W., 1989. Modelling of ageing, development, delays and dispersion. In: R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. Van Laar (Editors), *Simulation and systems management in crop protection*, Pudoc, Wageningen, pp. 47-79.
- Hannon, B. and Matthias, R., 1999. Multistage insect model. In: B. Hannon and M. Ruth (Editors), *Modelling dynamic biological systems*, Springer Verlag, New York, pp. 170-180.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*, 18 : 235-265.
- Karev, G.P., 2003. Inhomogeneous models of tree stand self-thinning. *Ecol. Model.*, 160: 23-37.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, S., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Europ. J. Agron.*, 18 : 267-288.
- Lassoudière, A., 1979^a. Comportement du bananier Poyo au second cycle. I- Rejetonnage et multiplication végétative. *Fruits*, 34 (11): 645-727.
- Lassoudière, A., 1979^b. Comportement du bananier Poyo au second cycle. II- Aspects généraux. *Fruits*, 34 (12): 713-727.
- Lassoudière, A., 1979^c. Comportement du bananier Poyo au second cycle. IV- Mise en évidence d'interactions entre rejet et pied mère et entre rejets frères. *Fruits*, 35 (2): 69-93.
- Lassoudière, A., 1980. Comportement du bananier Poyo au second cycle. III- Etude d'une population. *Fruits*, 35 (1): 3-17.
- Mekwatanakarn, W., 1987. A simulation model of production and flowering in bananas. Thesis of the University of Western Australia. p. 139.
- Odum, H.T. and Odum, E.C., 2000. Energy systems diagramming. In: *Modelling for All Scales: An Introduction to System Simulation*, H.T. Odum and E.C. Odum. (Editors). Academic Press, San Diego. pp.19-38.

- Philipps, P., D., Brash, T.E., Yasman, I., Subagyo, P., and van Gardingen, P.R., 2003. An individual-based spatially explicit tree growth model for forests in East Kalimantan (Indonesian Borneo). *Ecol. Model.*, 159: 1-26.
- Turner, D.W., 1994. Banana and plantain. *In* Environmental physiology of fruit crop. Vol. 2, 37-64, CRC Press. pp. 206-229.
- Turner, D., W., and Hunt, N., 1983. The relationship between temperature and the rate of appearance of new leaves on thirty banana varieties grown in the subtropics. *Garcia de Orta, Sér. Est. Agron.*, 10 (1-2): 91-94.
- Turner, D.W. and Lahav, E., 1983. The growth of banana plants in relation with temperature. *Aust. j. plant physiol.*, 10: 43-53.
- Wallach, D. and Goffinet, B., 1989. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecol. Model.*, 44: 299-306.

4.1.1.2. Etude de deux pratiques d'œilletonnage

La pratique de l'œilletonnage, qui consiste à sélectionner sur chaque pied mère le rejet successeur (celui du cycle suivant), influe de manière très importante sur l'état du peuplement. Les pratiques dites 'traditionnelles' visent souvent à homogénéiser les stades alors que les pratiques actuellement recommandées visent à raccourcir le cycle de chaque bananier mais avec pour conséquence une augmentation de l'hétérogénéité des stades. Il est donc important de bien prendre en compte ces différentes pratiques. Cette pratique va conditionner la durée entre 2 floraisons successives d'une même souche et donc la somme de températures entre ces 2 stades. Une expérience complémentaire a donc été menée afin d'affiner le paramétrage du module SIMBA-POP et plus particulièrement celui de 2 techniques d'œilletonnage différentes.

L'expérience a consisté à suivre pendant 2 cycles de culture (2^{em} et 3^{em} cycles), et de manière individualisée, deux sous populations de bananiers au sein d'une même parcelle. Pour chaque bananier, les dates de floraison du second et du troisième cycle ont été observées (au stade remarquable dit 'doigts horizontaux'). A partir des distributions des intervalles floraison-floraison il est donc possible de mesurer les paramètres (BH : seuil de début de sélection des rejets ; a_s , b_s et c_s les paramètres de la courbe log-normale de distribution de la sélection des rejets du module SIMBA-POP).

Matériel et méthode

Cette expérimentation est basée sur le fait que la distribution des sommes de températures (ou de semaines) accumulées dans l'intervalle floraison – floraison de chaque souche traduit l'effet de l'œilletonnage.

L'œilletonnage du premier cycle à été réalisé de manière identique (de type précoce) dans les 2 sous populations. La sélection du rejet pour les second et troisième cycles s'est faite selon 2 modalités :

- œilletonnage précoce : passage hebdomadaire et sélection du premier rejet positionné dans l'alignement du rang,
- œilletonnage traditionnel : sélection du rejet en une fois, choix d'un rejet de taille standard et bien positionné, puis passages d'entretien.

Les dates de floraison des 2ème et 3ème cycles ont été observées pour chaque bananier suivi. De plus, une mesure précise de la température a été réalisée tout au long de l'expérimentation. Pour chaque bananier la somme de températures (en base 14) entre la floraison du second et du troisième cycle a été calculée. La variabilité de cette somme de températures (intervalle floraison-floraison) a été étudiée pour chaque traitement par l'ajustement d'une courbe log-normale, ceci permettant de caractériser la dispersion autour d'une somme de température moyennes ainsi que la somme de températures minimales entre 2 floraisons (équivalent au seuil BT de SIMBA-POP). Cette somme de températures moyennes et la dispersion autour de cette moyenne définissent les paramètres de chaque pratique.

Sur l'ensemble de l'expérience les conditions de croissance des bananiers peuvent être considérées comme optimales, en effet, il s'agit d'une plantation après jachère (donc pas de parasitisme tellurique), avec une fertilisation optimale et pas de stress hydrique important. L'expérience a été conduite entre janvier 2003 et février 2004 sur la station CIRAD de Neufchâteau en Guadeloupe (parcelle Espérance pomme, altitude de 260 mètres, sol de type andosol, pluviométrie de 3365 millimètres d'eau entre janvier 2003 et février 2004).

Résultats

Les **figures II-4-a** et **II-4-b** présentent la distribution des intervalles floraison-floraison pour les deux types d'œilletonnage étudiés ainsi que les ajustements de courbes Gaussiennes en fonction respectivement de la somme de températures accumulées et du nombre de semaines depuis la floraison. Des courbes Gaussiennes nous en déduisons les paramètres BH (**figure II-4-a**) et les paramètres a_s , b_s et c_s (**figure II-4-b**) de SIMBA-POP.

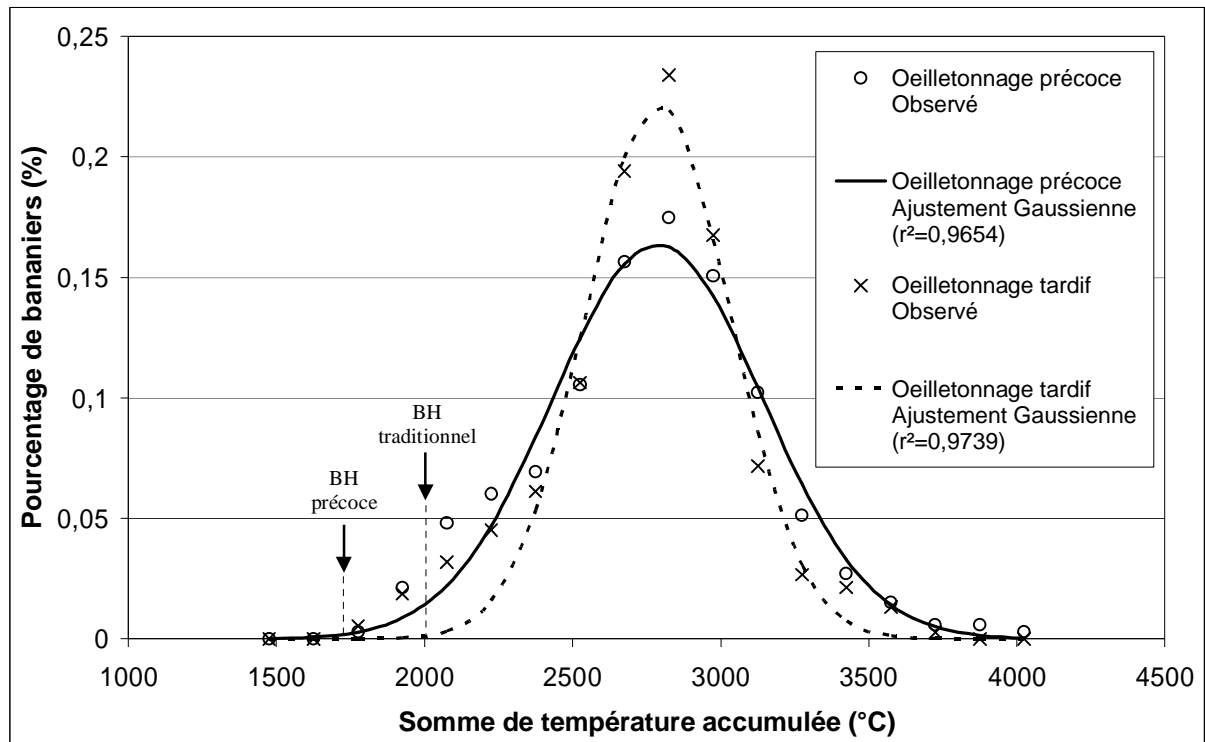


Figure II-4-a. Répartition de la somme de température accumulée (en °C et en base 14) dans des intervalles de 150°C, entre la floraison du second et du troisième cycle (parcelle Espérance pomme, station de Neufchâteau Guadeloupe) pour deux types d'œilletonnages (précoce et traditionnel) et ajustement d'une courbe Gaussienne.

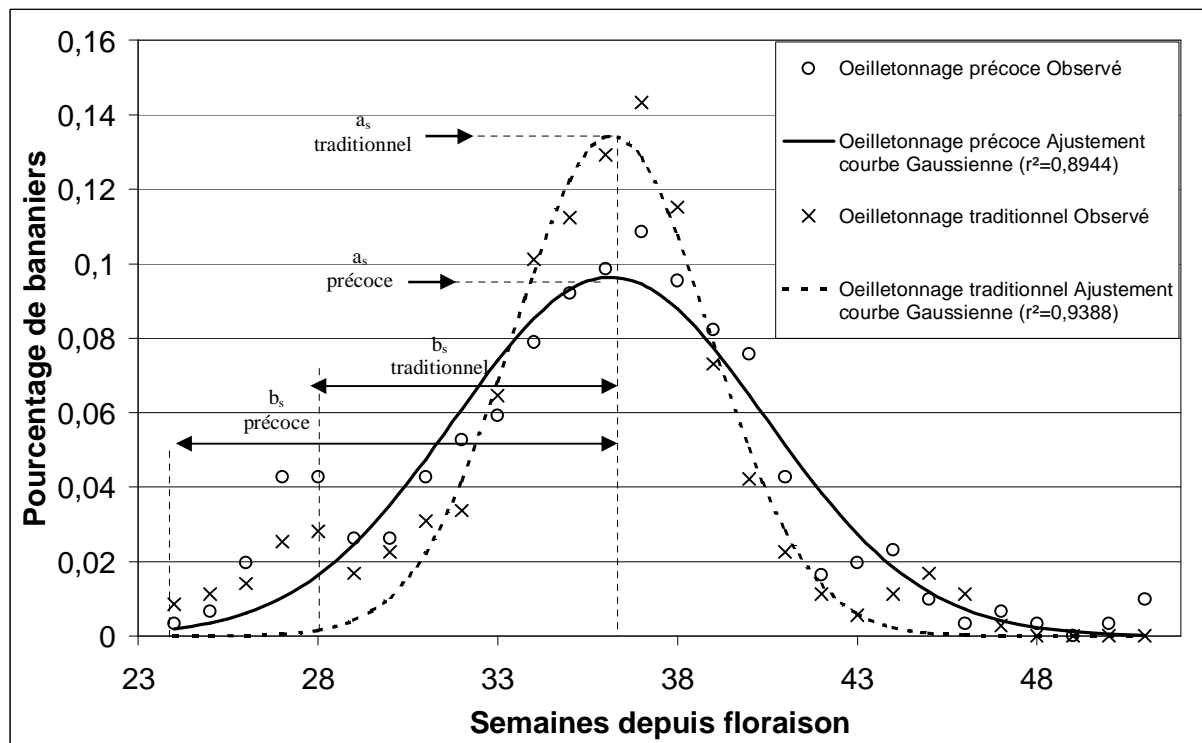


Figure II-4-b. Répartition du nombre de semaines observé, entre la floraison du second et du troisième cycle (parcelle Espérance pomme, station Neufchâteau Guadeloupe) pour deux types d'œilletonnages (précoce et traditionnel) et ajustement d'une courbe Gaussienne.

Le **tableau II-3** présente les valeurs des paramètres BH, a_s , b_s et c_s de SIMBA-POP pour les 2 types d'œilletonnage étudiés. Les paramètres a_s et b_s sont directement déduits des paramètres des courbes log-normales ajustées en **figure II-3-b**, BH et b_s sont estimés graphiquement respectivement sur les **figures II-4-a** et **II-4-b**.

Tableau II-3. Valeurs des paramètres de SIMBA-POP calibré pour des œilletonnages précoce et traditionnel.

Paramètres	Oëilletonnage précoce	Oëilletonnage traditionnel
BH (°C)	1750	2000
a_s (%)	0,096	0,134
b_s (semaines)	12	8
c_s	0,116 (LN) 4,321 (G)	0,075 (LN) 2,730 (G)

Ajustement Log-normal (LN) ; ajustement Gaussienne (G)

Discussion et conclusion

Les résultats obtenus lors de cette expérimentation sont cohérents avec ceux déjà obtenus par simple ajustement de paramètre (voir article SIMBA-POP) et apportent des précisions sur les paramètres associés à chaque pratique d'œilletonnage. Il est possible de noter que :

- la distribution des intervalles floraison – floraison qui traduit l'effet de l'œilletonnage ne semble pas asymétrique et donc une courbe Gaussienne est plus pertinente qu'une courbe log-normale pour la décrire,
- l'œilletonnage précoce induit un étalement des stades, avec un pic moins marqué,
- l'œilletonnage précoce amène à une courbe de distribution de l'intervalle floraison-floraison qui commence 300°C jours plus tôt (soit environ 4 semaines) que l'œilletonnage traditionnel, ceci est en accord avec les observations généralement réalisées (Lassoudière, communication personnelle),
- cependant il est surprenant que lors de l'expérience menée, il n'y ait pratiquement pas de différences entre les pics (maximum) des courbes de distribution. Ceci est peut être due à un problème lors de cette expérimentation ou à un phénomène qui nécessite des observations supplémentaires.

4.1.1.3. Les stress phénologiques et la verse des bananiers

Les stress phénologiques et la verse des bananiers jouent un rôle important sur le rendement final. La phénologie de la plante est modifiée lorsqu'elle est soumise à des stress importants (manque d'eau, problèmes de nutrition et attaques parasitaires). Seul les stress liés au parasitisme tellurique des nématodes phytoparasites seront pris en compte ici mais il faudra dans le futur paramétrer les autres stress parasitaires tels que ceux dus aux charançons du bananier et aux cercosporioses.

Le nématode phytoparasite *Radopholus similis* agit sur le rallongement de la phase végétative (paramètre BF de SIMBA-POP) et sur le taux de chute des bananiers (paramètre $d_{i,t}$ de SIMBA-POP). La variable représentative de l'effet des nématodes qui a été retenue est la moyenne des concentrations de *Radopholus similis* sur les 50 dernières semaines (idem pour le module SIMBA-GROW). A partir des données de Simon (1991) il a été possible d'établir une courbe reliant un coefficient d'allongement de la phase végétative et la moyenne de nématodes *Radopholus similis* des 50 dernières semaines (**figure II-5**). Ce coefficient correspond à la longueur supplémentaire ajoutée à la phase végétative (exprimé en pourcentage de la phase végétative). L'allongement de phase végétative n'est dans le jeu des données utilisées que d'environ 10% pour des concentrations en *Radopholus similis* comprise entre 200 et 250 nématodes par gramme de racine.

La calibration du taux de chute a également été réalisée à partir des données de Simon (1991), la **figure II-6** présente cette calibration. La dispersion observée s'explique par le fait que la chute des bananiers, bien qu'en grande partie due aux nématodes, est également dépendante des conditions climatiques (le vent), de l'état hydrique du sol et d'autres parasites notamment les charançons. La calibration effectuée ici n'est donc qu'une première étape qui devra être affinée.

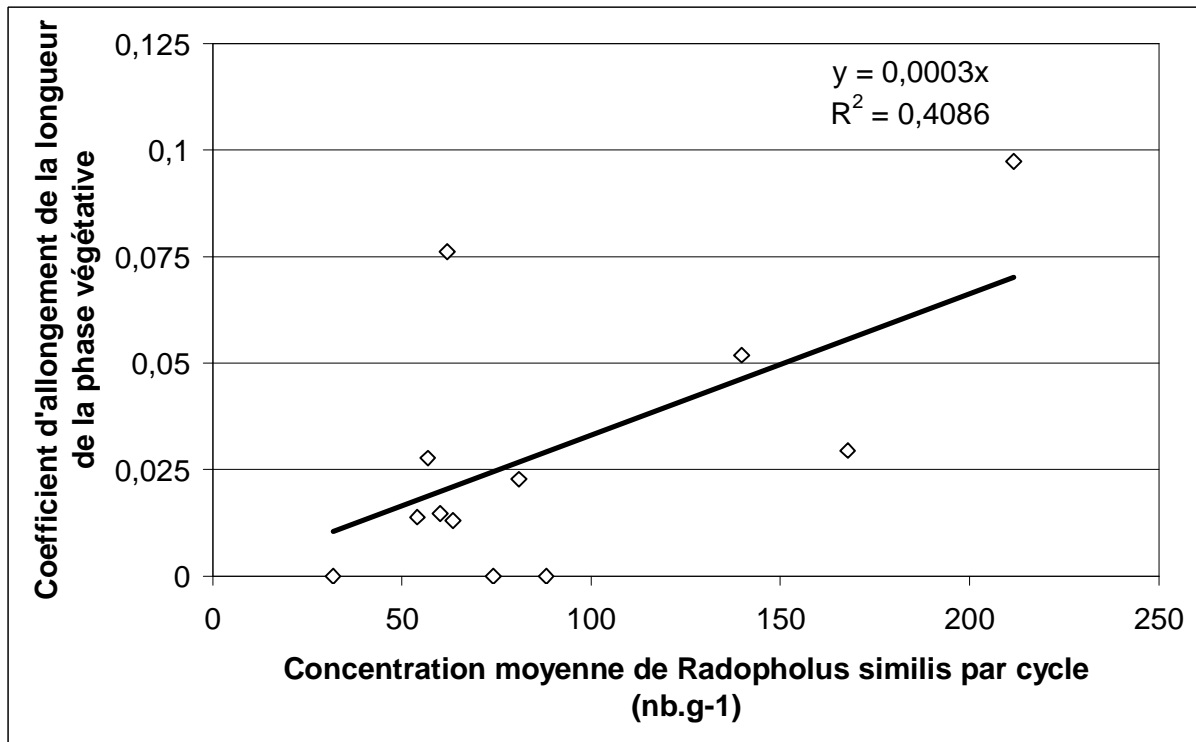


Figure II-5. Courbe de calibration du coefficient d'allongement de la phase végétative en fonction de la concentration moyenne des 50 dernières semaines en nématode *Radopholus similis*.

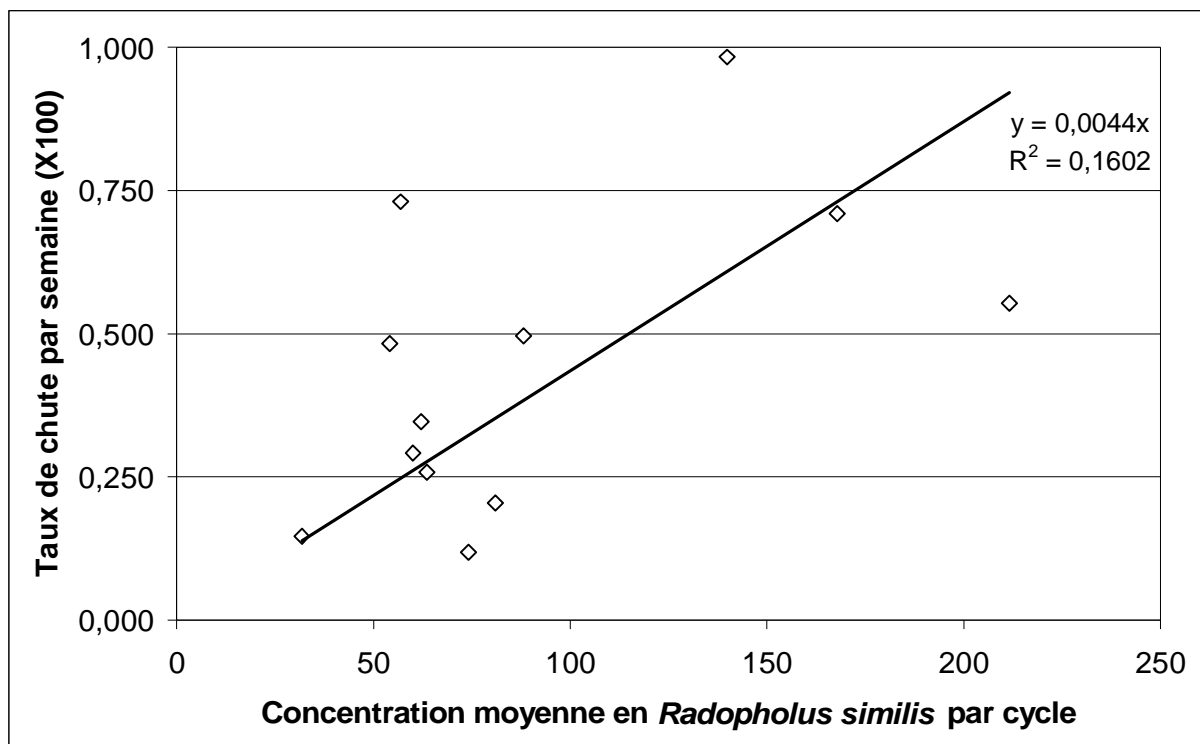


Figure II-6. Courbe de calibration du coefficient de chute (X100) en fonction de la concentration moyenne des 50 dernières semaines en *Radopholus similis*.

4.1.2. La croissance des bananiers : SIMBA-GRO

4.1.2.1. Introduction

La croissance du bananier est très variable selon les conditions de croissance et selon les parcelles et les exploitations considérées. Afin de permettre une simulation 'réaliste' des interactions 'pratiques culturales – milieu – croissance' il est nécessaire de prendre en compte les processus de croissance et d'élaboration du rendement du bananier. La croissance du bananier va influencer sur le poids du régime (Lassoudière, 1978). Le LAI (indice foliaire) qui influe sur le bilan hydrique ou la biomasse racinaire qui joue sur les populations de nématodes sont des variables qui interagissent également. L'objectif du module de croissance SIMBA-GRO est de simuler le rendement hebdomadaire de la parcelle en fonction des pratiques culturales et de l'environnement. SIMBA-GRO est lié au module de simulation de la structure du peuplement SIMBA-POP. Il interagit également avec le module de bilan hydrique SIMBA-WAT et avec les indicateurs de qualité du sol (chapitre III).

4.1.2.2. Principes de base de la modélisation dans SIMBA-GRO

Le module de croissance SIMBA-GRO est construit sur une structure en chaînes de cohortes, selon une structure similaire à SIMBA-POP. Ce module permet de simuler les caractéristiques individuelles (par cohorte) des bananiers d'une parcelle et certaines caractéristiques du peuplement (biomasse sèche, rendement, LAI). Il est organisé en deux chaînes de cohortes (pré et post floraison). Les variables sont calculées pour chaque cohorte dans un premier temps puis sommées ou moyennées sur l'ensemble du peuplement simulé. La **figure II-7.** présente une partie de la structure de SIMBA-GRO (pour 2 cohortes). Cette figure montre les liens avec le module de dynamique des populations (SIMBA-POP), notamment par le biais de l'effectif de chaque cohorte ($N_{i,t}$) ainsi que la somme de températures (base 14) qui lui est associée ($SUMT_{i,t}$).

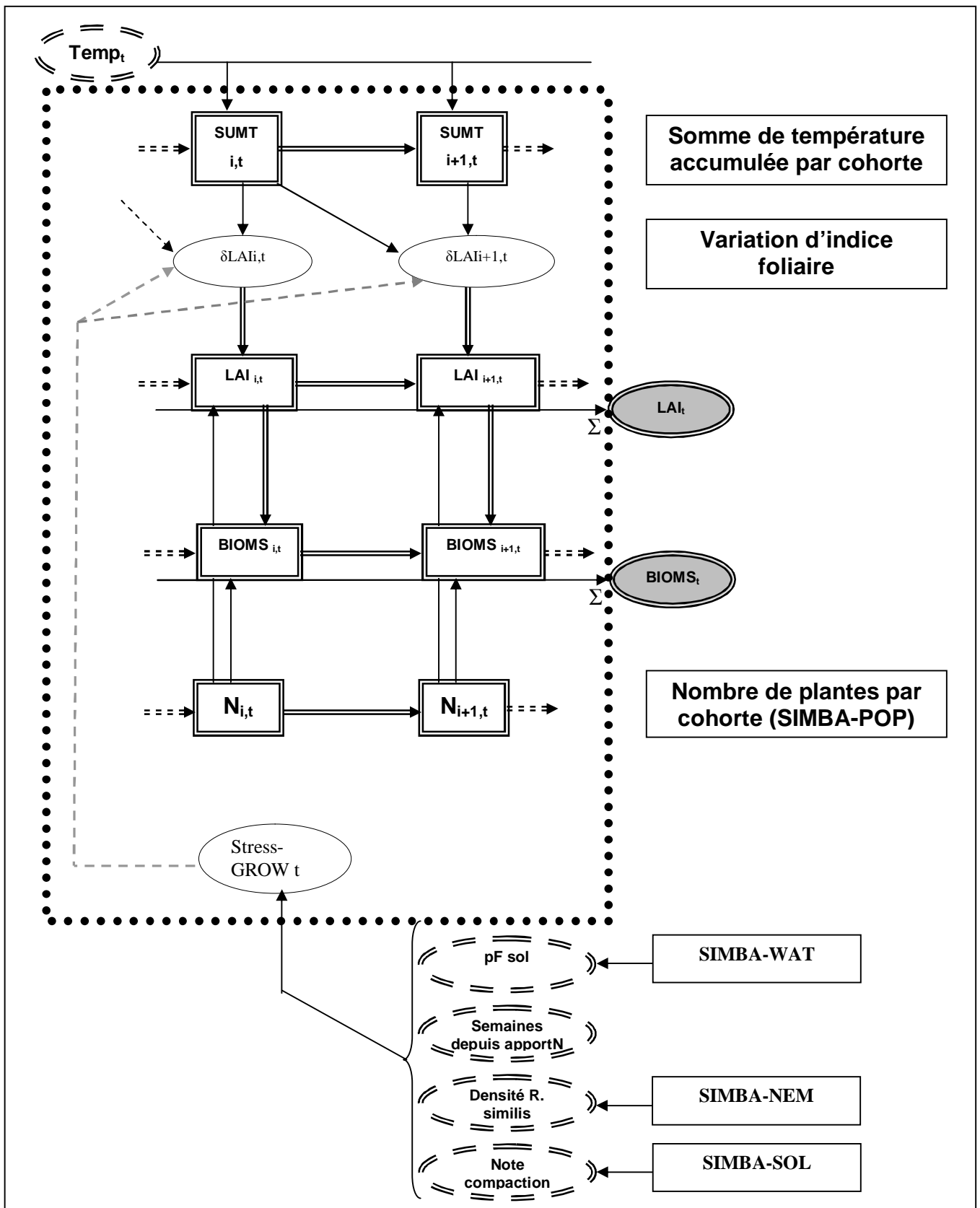
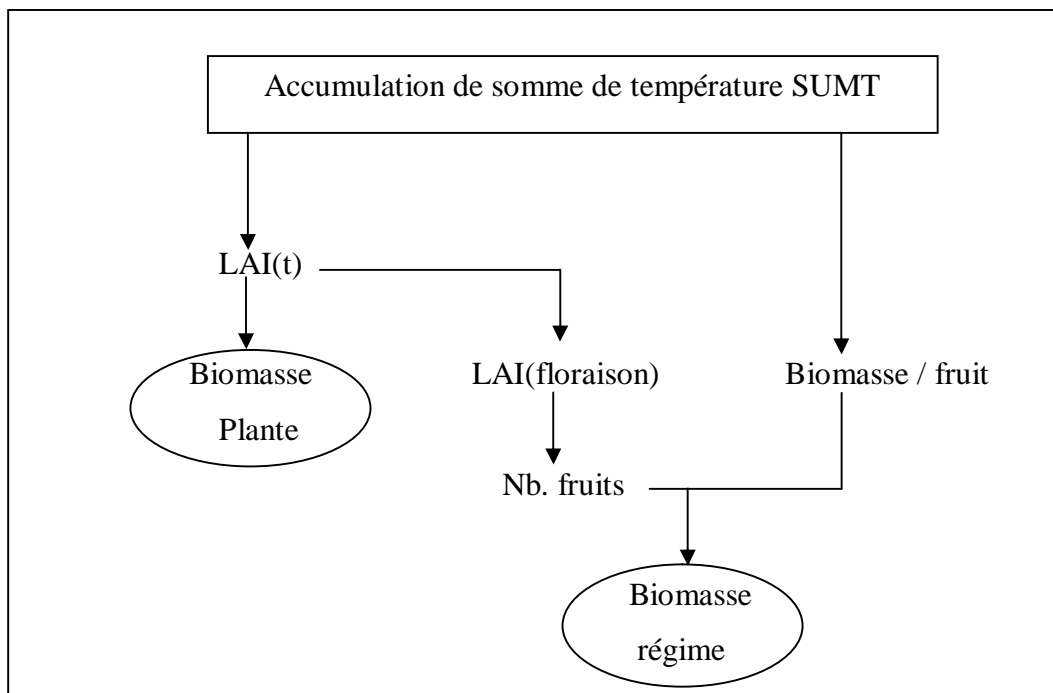


Figure II-7. Représentation schématique de SIMBA-GRO pour 2 cohortes de préfloraison (i et $i+1$) présentant le calcul de la variation d'indice foliaire, l'indice foliaire et la biomasse aérienne sèche de chaque cohorte et de toutes les cohortes ainsi que le facteur de stress qui s'applique à ce calcul.

L'indice foliaire (LAI) correspond à la surface de limbes rapportée à la surface de sol considérée. Il est calculé pour chaque cohorte puis moyenné sur l'ensemble des cohortes. Cette variable intervient dans de nombreux autres modules (bilan hydrique, couverture du sol, ...). La biomasse sèche aérienne ($BIOMS_t$) est calculée à partir de la relation établie à partir des données de Jannoyer (1995) qui relie la biomasse sèche et le LAI d'un bananier. Après la floraison, la biomasse sèche végétative est considérée comme constante. La biomasse sèche des fruits est calculée dans les cohortes de post-floraison, à partir de 2 relations (explicitées au paragraphe calibration de SIMBA-GRO 4.1.2.4.) :

- du nombre de doigts en fonction du LAI à la floraison établie à partir des données de Jannoyer (1995),
- du remplissage de ces fruits en fonction de la somme de température établie à partir des données de Julien (2000).

Le calcul du LAI, de la biomasse et de la biomasse du régime de chaque cohorte se fait selon le schéma suivant :



La biomasse sèche des racines du peuplement ($BIOMSRAC_t$), les biomasses fraîches de l'appareil végétatif ($BIOMF_t$), des racines ($BIOMFRAC_t$) et des fruits produits ($BIOMFF_t$) sont calculées à partir du ratio de répartition de la biomasse entre les différents organes de la plante et avec leur teneur en eau respectives.

La croissance potentielle des bananiers est uniquement pilotée par la somme de température (en base 14) accumulée par les plantes. Cette simplification par rapport au bilan de carbone de la plupart des modèles de culture est dictée par l'importance de ce facteur au regard du bilan radiatif.

Les caractéristiques du milieu sont prises en compte par des stress de croissance (hydriques, nutritionnels, édaphiques et parasitaires). Le calcul des stress de croissance du LAI et de la biomasse des fruits de SIMBA-GRO sont basés sur 4 hypothèses :

- chaque stress (sauf pour le stress parasitaire) a une réponse linéaire par rapport à la variable de stress considérée, entre le stress nul (optimum de croissance) et le stress maximal,
- les stress s'appliquent de manière identique pour tous les stades des bananiers
- les différents stress sont cumulatifs,
- il n'y a pas de compensation après qu'un stress ait cessé.

4.1.2.3. Les équations de SIMBA-GRO

Les équations et la signification des variables et des paramètres de SIMBA-GRO sont présentées respectivement dans les **tableaux II-5 et II-6**.

Les équations **1, 1' et 1''** présentent le passage des valeurs des 3 variables considérées d'une cohorte n au pas de temps t à la cohorte $n+1$ au pas de temps $t+1$, l'ajout des croissances hebdomadaire entre le pas de temps $t-1$ et t , ainsi que la prise en compte de l'effectif de la cohorte

Les équations **2, 2' et 2''** présentent le calcul de la variation de chaque variable entre les pas de temps $t-1$ et t . Le calcul de la croissance est basé

- pour le LAI potentiel (**Eq. 2**) sur 1 courbe sigmoïdale fonction de la somme de température de chaque cohorte ($SUMT_{i,t}$) et ayant 3 paramètres (a_{LAI} , b_{LAI} et c_{LAI}),

- pour la biomasse aérienne (**Eq. 2'**) sur une relation linéaire entre le LAI et la biomasse aérienne établie à partir des données de Jannoyer (1995) et de paramètres a_{bioms} et b_{bioms} ,
- pour la biomasse potentielle des doigts moyen des régimes d'une cohorte (**Eq. 2''**) sur une courbe sigmoïde fonction de la somme de température de chaque cohorte ($SUMTi,t$) et ayant 3 paramètres (a_{biomsf} , b_{biomsf} et c_{biomsf}) établie à partir des données de Julien (2000),
- pour le nombre de doigts de chaque régime de chaque cohorte (**Eq. 2'''**) sur une relation linéaire avec le LAI établie à partir des données de Jannoyer (1995) et des paramètres a_{doigt} et b_{doigt} .

Les stress influent sur la croissance, sur la phénologie et sur les effectifs. Ils sont pris en compte pour la croissance par le biais d'un coefficient de stress unique calculé dans l'**Eq. 3** qui vient s'appliquer à la variation de croissance des 2 variables considérés (LAI et biomasse des doigts). Il est calculé à partir des 4 facteurs de stress des composantes hydrique, parasitaire, nutritionnelle et liée à la structure du sol (**Eq. 3', 3'', 3''' et 3''''**) à partir de variables explicatives (une par stress) selon le modèle proposé par la **figure II-8**.

Les équations **4, 4' et 4''** présentent le calcul des variables LAI_t , $BIOMSt$ et $BIOMSft$ pour l'ensemble du peuplement de bananiers de la parcelle cultivée.

L'équation **5** montre le calcul de la biomasse racinaire sèche du peuplement en utilisant un facteur (root/shoot ratio : rsr_{ban}) et la biomasse total aérienne ($BIOMSt$).

Les équations **6, 6' et 6''** présentent le calcul des biomasses fraîches de l'appareil végétatif, des fruits et du système racinaire à partir des pourcentages respectifs en eau de ces parties du bananier et de leurs biomasses sèches.

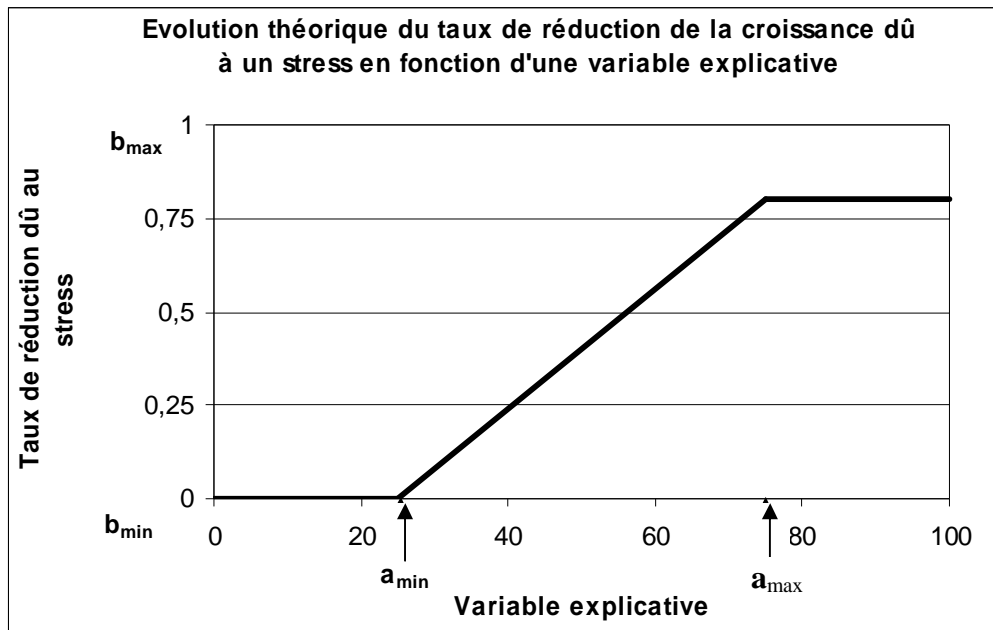


Figure II-8. Evolution théorique du taux de réduction de la croissance dû à un stress en fonction d'une variable explicative, avec a_{min} et a_{max} les limites d'optimum et de stress maximum de la variable considérée et b_{min} et b_{max} les taux de réduction de la croissance minimum et maximum.

Tableau II-5. Equations du module de croissance SIMBA-GRO.

Equations	N°
$LAI_{i,t} = ((LAI_{i-1,t-1} + \delta LAI_{i,t}) * N_{i,t}) / \text{densité initiale}$	1
$BIOMSi_{i,t} = (BIOMSn_{i-1,t-1} + \delta BIOMSn_{i,t}) * N_{i,t}$	1'
$BIOMSF_{i,t} = (BIOMSF_{i-1,t-1} + \delta BIOMSF_{i,t} * N_{doigt_{i,t}}) * N_{i,t}$	1''
$\delta LAI_{i,t} = aLAI / \exp(-(SUMT_{i,t} - bLAI)/cLAI) - aLAI / \exp(-(SUMT_{i-1,t-1} - bLAI)/cLAI) * S_{ressGRO}$	2
$\delta BIOMSi_{i,t} = (f(LAI_{i,t}) - f(LAI_{i-1,t-1}))$	2'
$\delta BIOMSF_{i,t} = aBIOMSF + bBIOMSF / (1 + \exp(-(SUMT_{i,t} - cBIOMSF)/dBIOMSF)) - aBIOMSF + bBIOMSF / (1 + \exp(-(SUMT_{i-1,t-1} - cBIOMSF)/dBIOMSF)) * S_{ressGRO}$	2''
$N_{doigt_{i,t}} = f(BIOMSi_{i,t})$	2'''
$S_{ressGRO} = S_{ressHYD} + S_{ressNEM} + S_{ressAZO} + S_{ressSOL}$	3
$S_{ressHYD} = f(pF_t)$	3'
$S_{ressNEM} = f(Radot)$	3''
$S_{ressAZO} = f(\text{Semaine_depuis_apportN})$	3'''
$S_{ressSOL} = f(\text{note_compaction_sol}_t)$	3''''
$LAI_t = \sum (i=1 \text{ à } i=n) LAI_{i,t}$	4
$BIOMS_t = \sum (i=1 \text{ à } i=n) BIOMSi_{i,t}$	4'
$BIOMSF_t = \sum (i=1 \text{ à } i=n) BIOMSF_{i,t}$	4''
$BIOMSRAC_t = BIOMS_t * r_{srban}$	5
$BIOMF_t = BIOMS_t * p_{eaerien}$	6
$BIOMFF_t = BIOMSF_t * p_{efruit}$	6'
$BIOMFRAC_t = BIOMSRAC_t * p_{erac}$	6''

Tableau II-6. Signification des variables et des paramètres du module SIMBA-GRO.

Variables	Signification (unités)
$N_{i,t}$	Effectif de la cohorte i au pas de temps t
$SUMT_{i,t}$	Somme de température hebdomadaire en base 14 de la cohorte i au pas de temps t
densitéinitiale	Nombre de bananier à la plantation
LAI t	Indice foliaire de du peuplement au pas de temps t
$LAI_{i,t}$	Part de la cohorte i sur l'indice foliaire du peuplement au pas de temps t
$\delta LAI_{i,t}$	Variation de l indice foliaire de la cohorte i au pas de temps t
BIOMS t	Biomasse sèche du peuplement au pas de temps t (kg)
$BIOMS_{i,t}$	Biomasse sèche de la cohorte i au pas de temps t (kg)
$\delta BIOMS_{i,t}$	Variation de biomasse sèche d'un fruit moyen de la cohorte i au pas de temps t (kg)
BIOMSF t	Biomasse sèche des fruits du peuplement au pas de temps t (kg)
$BIOMSF_{i,t}$	Biomasse sèche des fruits de la cohorte i au pas de temps t (kg)
$\delta BIOMSF_{i,t}$	Variation de biomasse sèche des fruits de la cohorte i au pas de temps t
Ndoigti	Nombre de doigt de la cohorte i
BIOMSRAC t	Biomasse sèche du système racinaire (kg)
BIOMF t	Biomasse fraîche de l'appareil végétatif aérien du peuplement (kg)
BIOMFF t	Biomasse fraîche des fruits du peuplement (kg)
BIOMFRAC t	Biomasse fraîche de l'appareil racinaire du peuplement (kg)
SressGROt	Coefficient de stresse appliqué à la croissance hebdomadaire du LAI, et de la biomase sèche des fruits au pas de temp t (0-1)
StressHYD	Coefficient de stresse hydrique (0-1)
StressNEM	Coefficient de stresse parasitaire (0-1)
StressAZO	Coefficient de stresse nutritionnel (0-1)
Stress SOL	Coefficient de stresse lié à la structure du sol (0-1)
pF(t)	Potentiel hydrique de l'eau dans le sol au pas de temps t (unité pF)
Radot	densité en nématode Radopholus similis au pas de temp t (nb.g de racine -1)
Semaine_depuis_apportN	Nombre de semaines depuis l'application d'engrais azoté (nombre)
Note-compaction_sol t	Note de compaction calculé par SIMBA-SOL (note)
aLAI, bLAI, cLAI	les paramètres de la courbes de croissance du LAI (/1 plante)
aBIOMS, bBIOMS,	les paramètres de la courbes de croissance de BIOMS (/1 plante)
aBIOMSF, bBIOMSF, cBIOMSF	les paramètres de la courbes de croissance de BIOMSF (/1 plante)
rsrban	Root/shoot ration du bananier
peaérien	Teneur en eau moyenne de l'appareil végétatif aérien du bananier
pefruit	Teneur en eau moyenne des fruits du bananier
perac	Teneur en eau moyenne du système racinaire du bananier

4.1.2.4. La calibration de SIMBA-GRO

Les 2 courbes des croissances sigmoïdales du LAI en préfloraison et de la biomasse en fruit en post-floraison ont été calibrées avec des données de terrains en conditions de croissance optimales (Dorel, 2001 ; Julien, 2000 ; Jannoyer 1995) pour le LAI et (Julien, 2000) pour la biomasse des fruits. Les **figures II-9 A et B** présentent les données de terrain et les sigmoïdes

ajustées à ces données pour la croissance en LAI et en biomasse de fruit. Le tableau II-7 présente les paramètres de ces deux courbes.

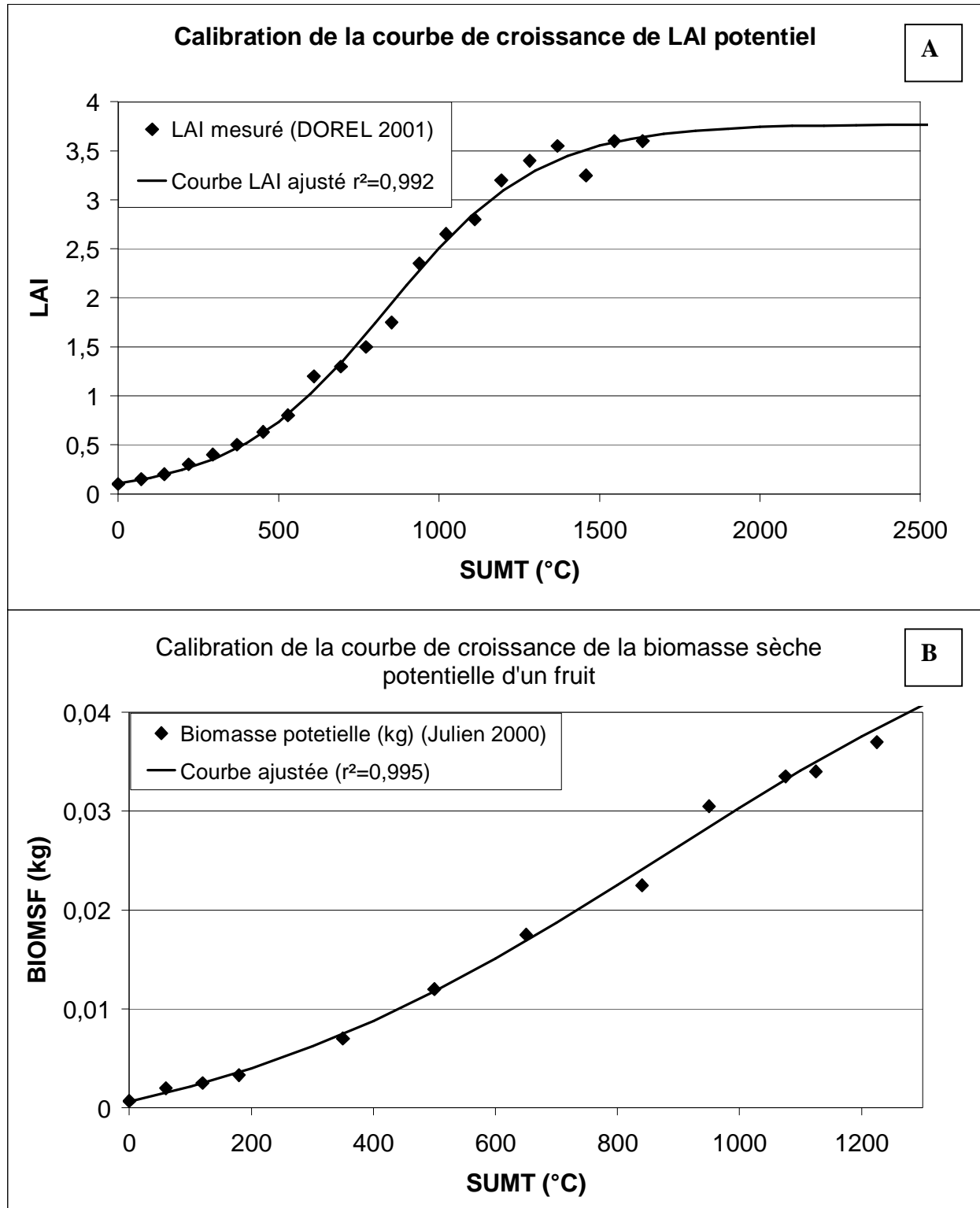


Figure II-9. Calibration de la courbe de croissance du LAI en fonction de la somme de température (°C) accumulé depuis la plantation (d'après Dorel 2001) avec les paramètres 3,77 ; 836,8 et 237,7 (A), et de la courbe de croissance de la biomasse sèche d'un fruit en fonction de la somme de température (°C) accumulé depuis la floraison (d'après Julien 2000) avec les paramètres 0,00537 ; 0,062011 ; 878,94 et 394,76 (B).

La relation entre la biomasse aérienne végétative et le LAI suit une droite qui a pour équation : $BIOMS = 1,5873 * LAI - 0,1429$ (BIOMS en Kg et LAI en $m^2.m^{-2}$) et qui a été établie à partir des données formant la courbe enveloppe mesurées par Jannoyer (1995) **figure II-10**.

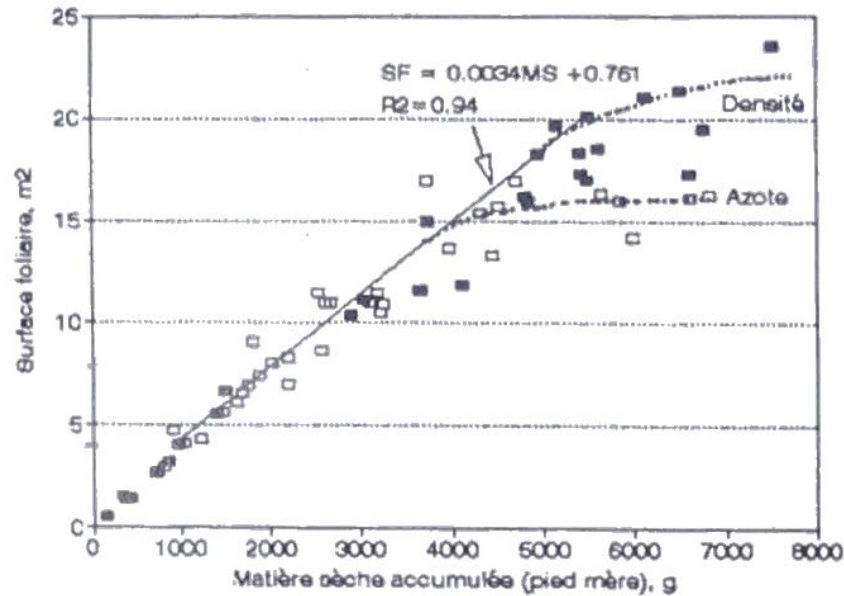


Figure II-10. Relation surface foliaire ($m^2.plante^{-1}$) et matière sèche accumulée (g) par le pied mère (d'après Jannoyer 1995).

La relation linéaire entre le LAI à la floraison et le nombre de doigts du régime suit une droite qui a pour équation : $Ndoigt = 31,004 * LAI + 58.947$ (LAI en $m^2.m^{-2}$) et qui a été établie à partir des données formant la courbe enveloppe de mesures réalisées par Jannoyer (1995) **figure II-11**.

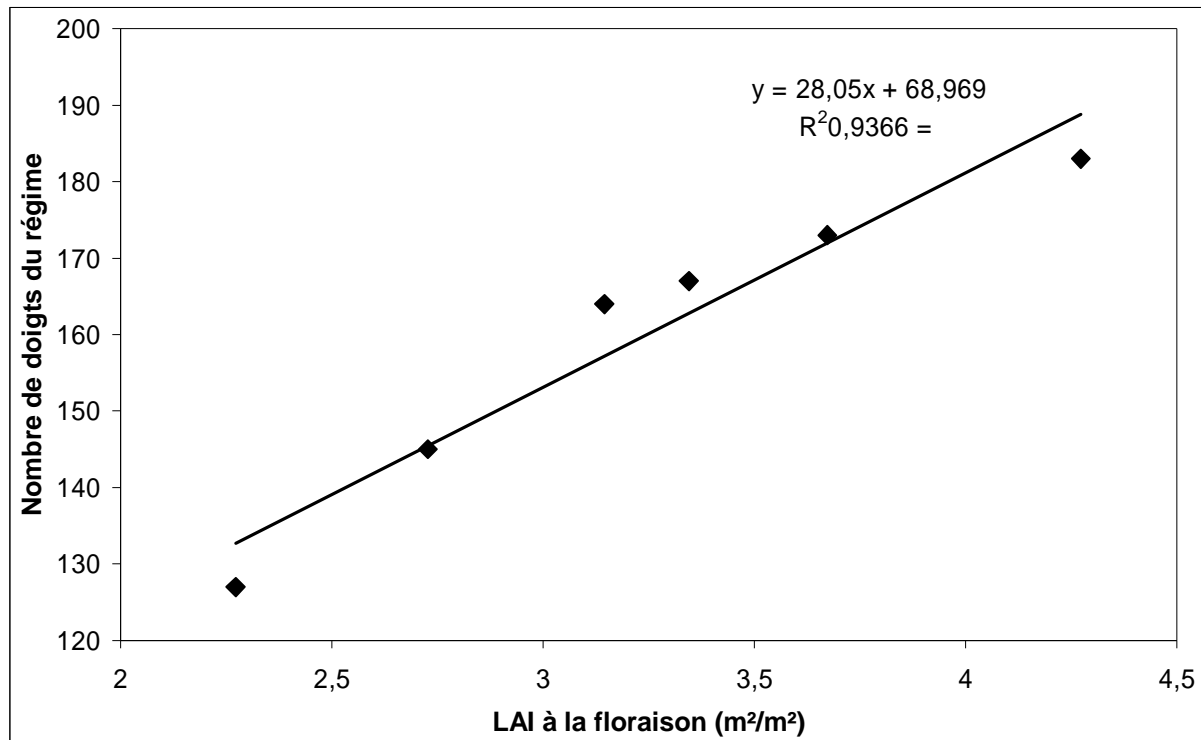


Figure II-11. Relation entre le nombre de doigts du régime et la surface foliaire (m².plante-1) (d'après Jannoyer 1995).

La valeur du root/shoot ratio des bananiers est considéré soit comme fixe (Blomme, 2000) égale à 0,11 soit comme variable au cours du développement du bananier (Lecomte, 2002 ; Shaffer et al., 1996 ; Tuner et Lahav 1983) variant respectivement entre : 0,37 à 0,17 ; 0,19 à 0,23 ; 0,11 à 0,23 suivant différentes conditions environnementales. La valeur considérée ici comme constante et égale à : $rsr_{ban} = 0,22$ constitue une valeur moyenne. Ce rapport varie de manière importante au début du développement du bananier avec des croissances de biomasses relativement faibles par rapport à celles des bananiers plus âgés. L'erreur possible provoquée par un root/shoot ratio fixe reste relativement faible.

Le **tableau II-7** présente les teneurs en eau dans les différentes parties du bananier, elles sont le résultat des mesures de Lassoudière (1978^a), Barnel (1940), Martin Prével (1966) et ont fait l'objet d'un calcul pondéré (aérien = pseudo-tronc + limbes + nervure ; souterrain = souche + racines ; fruit = pulpe + peau).

Tableau II-7. Valeur des teneurs en eau moyennes dans les parties aériennes (peaérien), des fruits (pefruit) et des racines (perac) du bananier (d'après Lassoudière 1978 et Barnel, 1940 ; Martin Prével et Montagut, 1966 ; Julien, 2000).

Paramètres de SIMBA-GRO	Valeur moyenne (%)
peaérien	88
pefruit	70
perac	94

4.1.2.5. La calibration des stress de croissance

Les taux de réduction de chaque facteur de stress ainsi que les variables explicatives qui leur sont associées ont été représentés sur le tableau II-8. Ce tableau a été établi à partir de :

- Pour le stress nutritionnel : Jannoyer (1995) montre qu'entre des apports mensuels d'azote (120 grammes) et aucun apport il y a une variation finale de LAI de 22% et une variation du nombre de doigts total du régime de 8.9%. Lahav et Lowengart (1998) mettent en évidence qu'une réduction des apports d'azote de 33% par rapport à la dose standard ne provoque pas de baisse de la biomasse sèche du régime. De même Godefroy et Dormoy (1989) ne mettent pas en évidence d'effet significatif des doses d'azote apportées variant entre 1,5 et 0.75 fois la valeur moyenne apportée en plantation. Ces différentes approches confirment que la fréquence des apports d'azote joue un rôle prépondérant. La variable explicative retenue est le nombre de semaines depuis le dernier apport. Nous retiendrons comme effet maximal du manque d'azote une réduction de 22% pour 40 semaines sans apport d'azote (établi à partir des données de Jannoyer 1995).
- Pour le stress hydrique : Holder (1982) établit une relation linéaire entre le potentiel hydrique du sol (pF) et la croissance en longueur du pseudo-tronc ($y = -2.344 \text{ pK} + 18.941$; $r = -0.799$) soit une croissance nulle pour $\text{pF} = 8$. Robinson et Bower (1987) montrent qu'à partir d'une tension de l'eau dans le sol de -20 à -25 kPa il y a un début d'effet sur la transpiration. Selon Ke (1979), en dessous de 70% de la réserve utile en eau du sol la teneur en matière sèche, la teneur en chlorophylle, la conductance et le taux d'assimilation chutent. Hoffmann et Turner (1993) ont montré qu'il existe une

relation exponentielle entre le taux d'élongation du cigare (la dernière feuille en train de sortir en haut du pseudo-tronc) et le potentiel hydrique. Hegde et Srinivas (1989) ont mis en évidence que pour le potentiel en eau du sol de -25kPa à -85kPa il y a une réduction de la biomasse du régime de 22%. Holder et Gumbs (1982) ont montré qu'un stress hydrique continu réduit le nombre de doigts par main de 8%. Nous retiendrons que le taux de réduction de la croissance du au stress hydrique commence pour une tension de l'eau de 20kPa et suit une courbe de type ' $y = a+bx+c/x$ '. La **figure II-12** présente la courbe calibrée avec les données de Robinson et Bower (1987) avec les paramètres a, b et c respectivement 44 ; 0.038 et 486.

- Pour le stress parasitaire : dans le cas de SIMBA, seul le stress du à *Radopholus similis* l'espèce de nématode phytoparasite la plus courante et la plus préjudiciable (Gowen et Quénéhervé, 1990) est prise en compte. Les essais phytosanitaires (comparatif de différents nématicides) de Simon (1991) ont permis d'établir la relation entre la perte de rendement et la concentration moyenne en *Radopholus similis* du cycle (**figure II-13**). Au dessus de 140 nématodes par gramme de racine nous considérons que le stress est maximum et atteint environ 20% de réduction du rendement. L'équation retenue n'est pas une droite mais un polynôme du second degré qui est :

$$y = -0,001 * R_s^2 + 0,287 * R_s$$
- Pour le stress lié aux contraintes structurelles du sol : Dorel (2001) a mis en évidence une réduction de 10% du LAI dans le cas d'un labour superficiel par rapport à un labour profond. Lecomte (2002) montre qu'entre un sol fortement compacté et un sol non compacté, il y a une variation du LAI de 30%. C'est cette dernière valeur que nous retenons pour un stress maximal. La variable du modèle qui permet de rendre compte des états structurels du sol est la note de compaction du sol calculée par le module SIMBA-SOL.

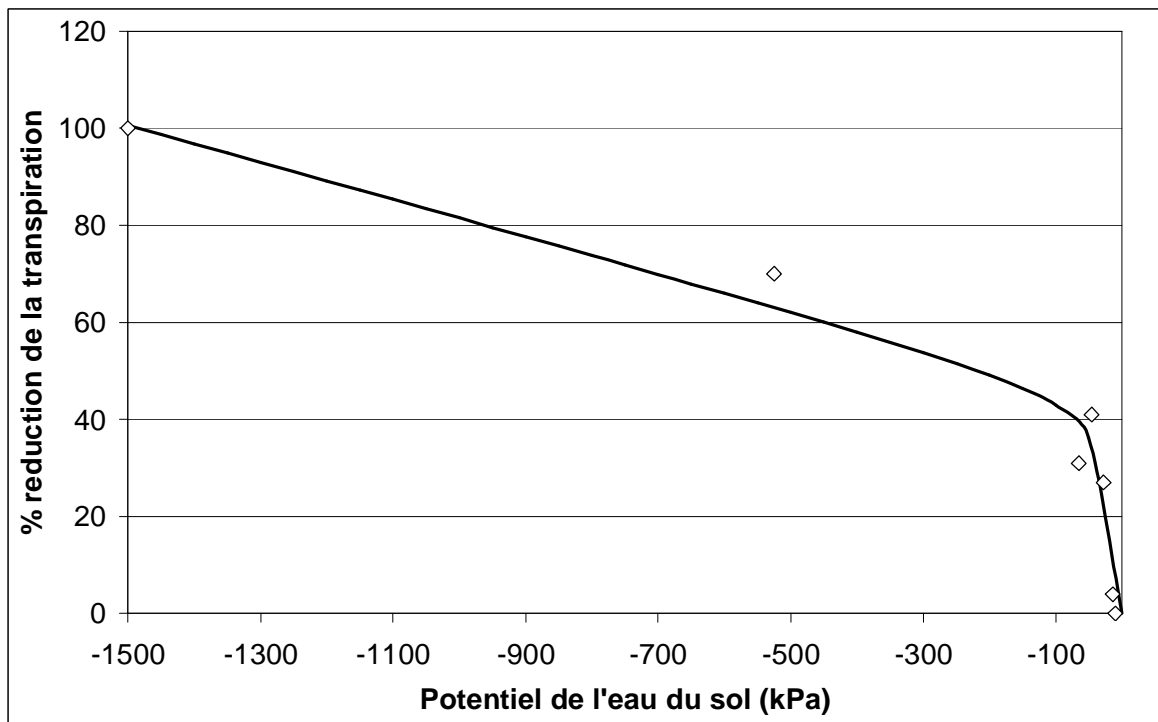


Figure II-12. Evolution du taux de réduction de la transpiration en fonction de la pression de l'eau dans le sol (d'après Robinson et Bower, 1987) $R^2 = 0.974$.

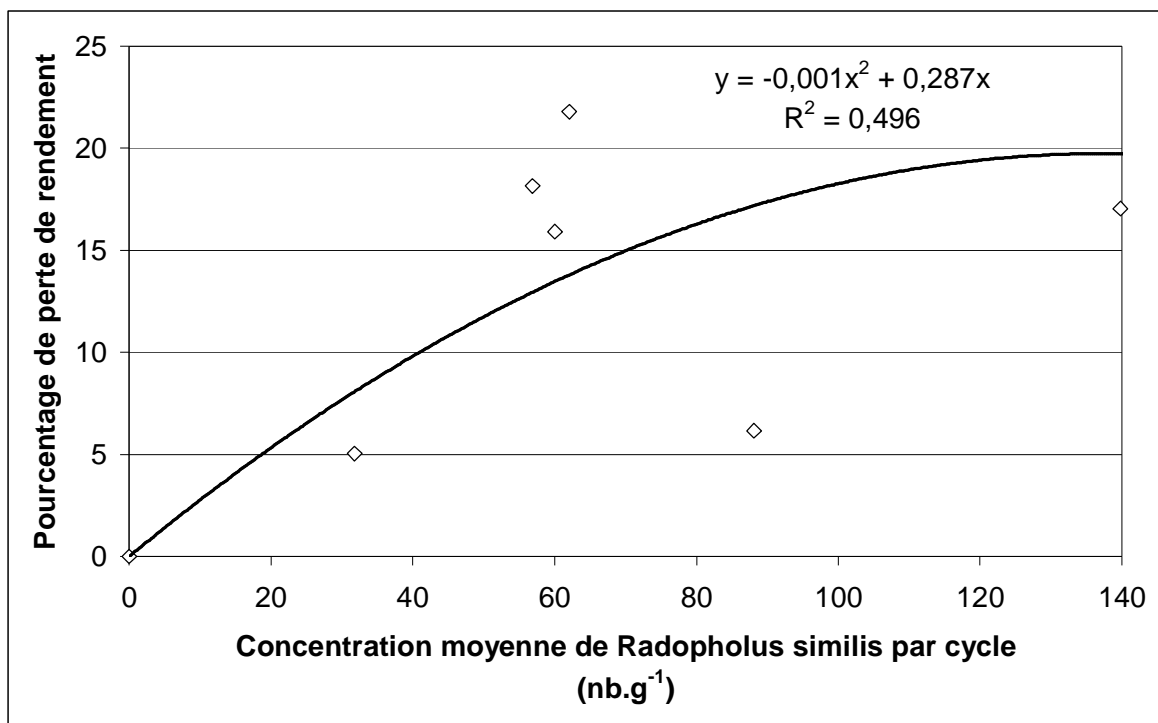


Figure II-13. Evolution du taux de réduction du rendement en fonction de la concentration moyenne en *Radopholus similis* (nombre par gramme de racine) (d'après Simon, 1991).

Tableau II-8. Valeur maximale de réduction de la croissance des stress hydrique, nutritionnel, parasitaire est liée à la structure du sol, variables explicatives associées et limites optimum (a_{\min}) / stress maximum (a_{\max}) de ces variables.

Facteurs de stress	% maximal de réduction de la croissance	Variables explicatives	Valeur limite de l'optimum (a_{\min})	Valeur pour un stress maximal (a_{\max})
StressHYD t	100	ETP t / ETr t	1	0
StressAZO t	22	semaines_depuis_apport t	4	40
StressNEM t	60	Rs. Moyen (-52 ;-1) t	0	200
StressSOL t	20	Note_compaction_sol t	0	10

4.1.2.6. Exemple de sorties avancées de SIMBA-GRO

Le couplage des 2 modules SIMBA-GRO et SIMBA-POP permet de calculer l'évolution au cours du temps de la biomasse récoltée sur une parcelle. La **figure II-15** présente 3 exemples de simulation pour des systèmes de culture ayant des niveaux d'intensification et des altitudes différentes.

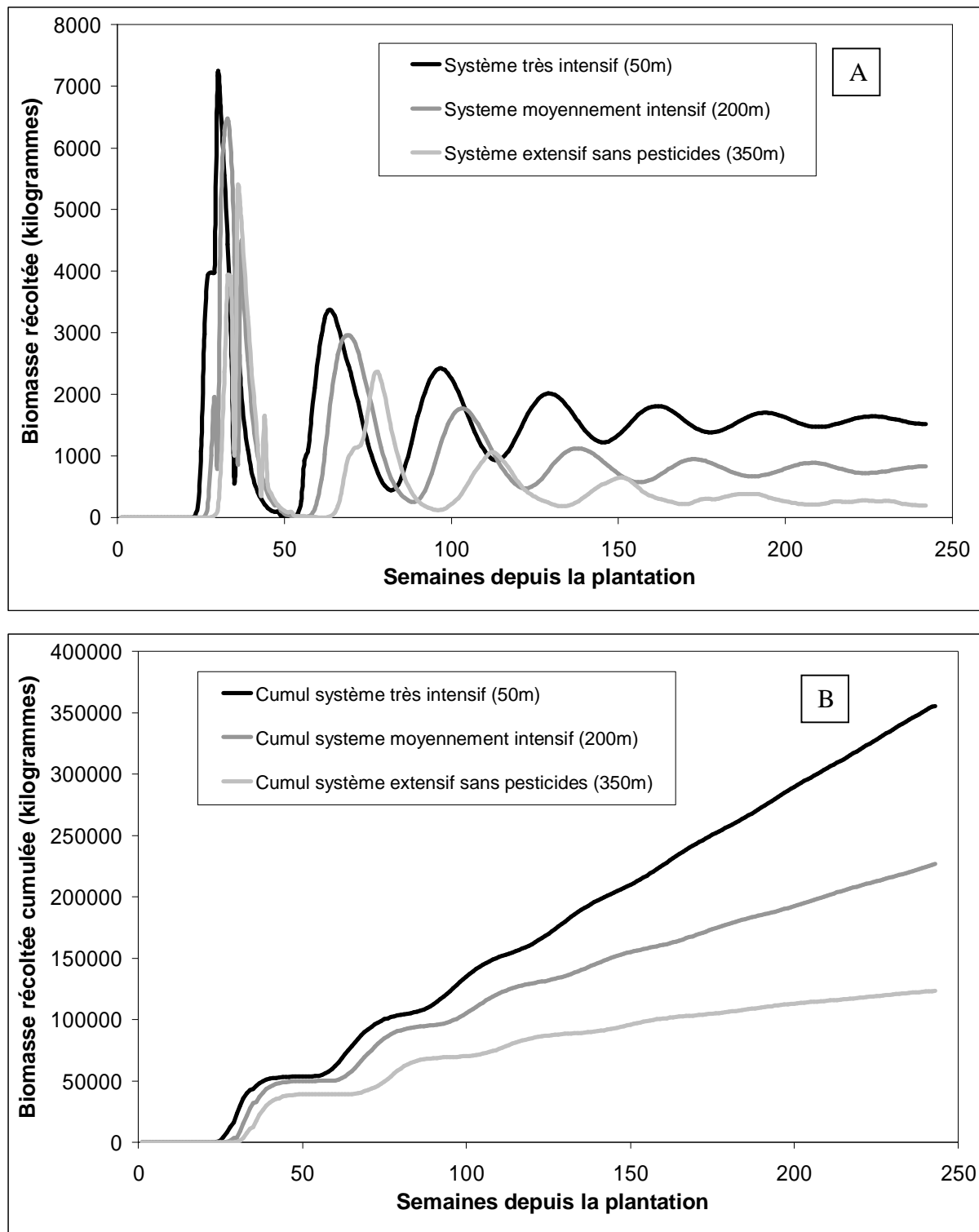


Figure II-15. Présentation de la simulation de la biomasse récoltée hebdomadaire (A) et cumulée (B) au cours du temps pour un système très intensif, un système semi intensif et un système très extensif aux altitudes respectives de 50, 200 et 350 mètres. Les 3 systèmes sont caractérisés respectivement par des doses et fréquences d'apport de fertilisant de 130g et 0.3 ; 100g et 0.2 ; 80 et 0.125, par des traitements nématicides tous les 15 ; 30 et 50 semaines et par le remplacement des bananiers chutés à partir des seuils de chute de 15 % ; 30% et aucun.

4.1.3. La canne à sucre (utilisation de MOSICAS)

La croissance de la canne à sucre (LAI, biomasse et rendement) est prise en compte par SIMBA. Ce module correspond à l'adaptation du modèle (Martiné, 2003). MOSICAS fonctionne sur un pas de temps journalier et dispose de son propre module de bilan hydrique. Il a été adapté pour fonctionner au pas de temps de la semaine et utiliser le module de bilan hydrique de SIMBA (SIMBA-WAT). Le module de bilan hydrique permet de calculer les stress de croissance qui sont ensuite utilisés dans le module de croissance. Le module de croissance de MOSICAS est organisé selon 3 processus de fonctionnement :

- l'interception du rayonnement utile par l'indice foliaire permettant de calculer le rayonnement intercepté,
- la conversion de ce dernier en biomasse,
- la partition de cette biomasse en ses différentes composantes : racines, feuilles, tiges et sucre.

Les sorties de ce module sont : le LAI du couvert, la biomasse totale, la biomasse récoltée (tiges usinables) et leur teneur en sucre.

4.1.4. La prise en compte d'autres cultures et la gestion des rotations

La simulation des rotations est effectuée dans SIMBA selon 2 méthodes i) par la prise en compte d'un état initial qui traduit l'effet du précédent cultural sur le milieu et l'environnement ii) par la simulation directe de la plante de rotation (canne à sucre).

Le niveau initial de l'inoculum nématologique étant central dans la problématique bananière, c'est cette variable qui traduit en premier lieu l'état initial. Le **tableau II-9** présente les valeurs des inoculum pour les espèces *Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae* pour différents précédents culturaux. L'ensemble des valeurs présentées dans la tableau II-9 ont été établies à partir d'interrogations d'experts et de mesures de suivi nématologique dans ces différentes cultures (Risède, communication personnelle).

Tableau II-9. Inoculum nématologique initial pour les espèces *Radopholus similis* (Rs) et *Pratylenchus coffeae* (Pc) et pour différents précédents cultureux.

Précédent cultural	Inoculum nématodes	
	Rs.	Pc. (nb.g ⁻¹)
Bananiers	0.1	0
Jachère (6mois)	0.001	0
Jachère (1an)	0.0001	0
Canne à sucre	0.0001	0.1

A partir de ces conditions initiales SIMBA simule la composante bananière du système de culture. L'évaluation qui en résulte est faite sur la période 'bananière' du système de culture. Le choix d'une plante cultivée au sein de la rotation est piloté par des règles de décisions de type stratégique. Lorsque la décision est prise de changer de culture, SIMBA exécute les pratiques de fin de culture (destruction de la plante) et de début de culture (plantation). Ces pratiques sont sous le contrôle des règles de décision tactique liées à chaque type de plante cultivée.

4.2. Le sol

Le sol influe sur la croissance de la plante (contraintes racinaires), les transferts d'eau et les phénomènes environnementaux. Les caractéristiques structurales ainsi que la couverture du sol évoluent au cours du temps, avec la plante cultivée et les différentes pratiques culturales (travail du sol, passages mécanisés, contrôle de la couverture). Le modèle SIMBA simule la structure du sol et sa couverture. Ces deux caractéristiques ont différentes interactions avec d'autres modules (bilan hydrique, croissance) ou indicateurs.

4.2.1. La structure du sol –SIMBA-SOL

Le module SIMBA-SOL conçu selon une approche semi-quantitative a été développé pour les andosols de Guadeloupe. Une note de compaction variant entre 0 et 10 est calculée chaque semaine. Le calcul de cette note est basé sur :

- l'effet de pratiques (labours et passages mécanisés),
- l'état hydrique du sol,
- l'évolution du sol vers un état naturel en équilibre (climax).

La profondeur de sol considérée est celle potentiellement colonisable par les racines de bananier (environ 80 centimètres). La **figure II-17** présente la structure générale de SIMBA-SOL et le **tableau II-10** présente les équations, la signification des variables et la valeur des paramètres calibrés.

La structure de ce module et la valeur des paramètres sont issus des connaissances existantes sur le fonctionnement des andosols (Dorel, 2001) et sur un grand nombre de profils culturaux réalisés sur l'ensemble de la zone de culture bananière (Dorel, communication personnelle). La note de compaction dépend du nombre de passages mécanisés (autre que le labour) et d'un facteur correctif du à la teneur en eau du sol. La décompaction remet à zéro la note de compaction au prorata de la profondeur de la couche de sol travaillée. La mécanisation des opérations culturales d'entretien de la bananeraie (apport d'engrais, d'herbicides, de labours de désherbages) n'est considérée possible que pendant 3 cycles.

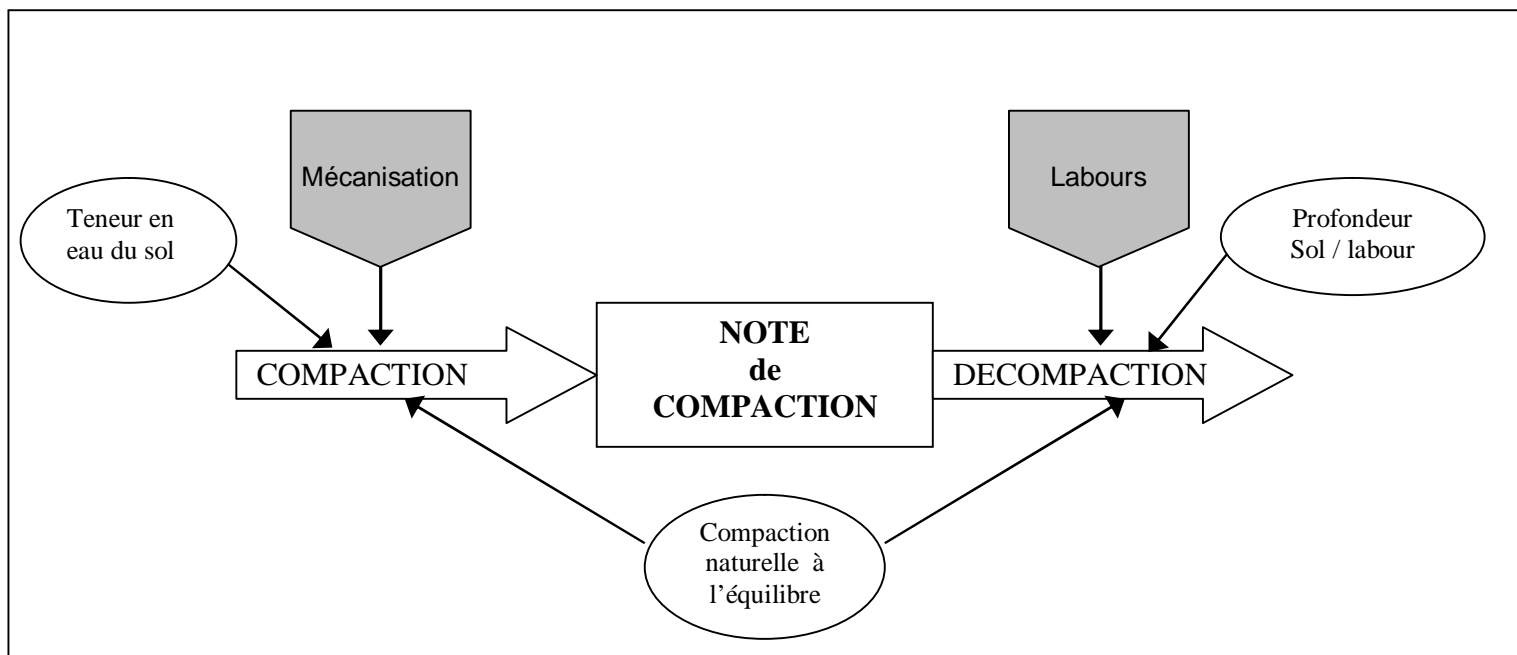


Figure II-17. Structure de SIMBA-SOL.

Tableau II-10. Equations et valeur des paramètres de SIMBA-SOL.**EQUATIONS**

Note_compaction_t = note compaction_{t-1} + Compaction_t – Décompaction_t + Evolution_naturelle_t

Compaction_t = (nb_passages_mécanisés_t * facteur_eau_du_sol_t) * *effet_compaction_ini*

Décompaction_t = nb_passages_labours_t * (profondeur_total / profondeur_labour_t)

Evolution_naturelle_t = Si (Note_compaction_{t-1} > *Note_équilibre*) Alors (-Evol_hebdo) sinon (+ Evol_hebdo)

facteur_eau_du_sol_t = f(pourcentage_eau_sol_t)

VARIABLES

Note_compaction_t	Note de compaction du sol (bornée entre 0 et 10)
Compaction_t	Effet de la compaction du sol sur la note de compaction
Décompaction_t	Effet de la décompaction du sol sur la note de compaction
Evolution_naturelle_t	Effet de l'évolution naturelle sur la note de compaction
facteur_eau_du_sol_t	Effet du pourcentage en eau du sol sur la compaction
nb_passages_mécanisés_t	Nombres de passages mécanisés au pas de temps t
nb_passages_labours_t	Nombres de labours au pas de temps t
profondeur_labour_t	Profondeur du labour réalisé au pas de temps t
pourcentage_eau_sol_t	pourcentage en eau du sol

PARAMETRES

profondeur_total_t	Profondeur de la couche de sol simulée	0,8 m
effet_compaction_ini	Effet élémentaire de la compaction	1
Note_équilibre	Note de compaction à l'équilibre naturel	3
Evol_hebdo	Evolution naturelle hebdomadaire	0.03

La **figure II-18** présente le résultat de la simulation de la note de compaction du sol pour 2 systèmes de culture : un système fortement mécanisé avec plantation après labour puis mécanisation des opérations d'entretien de la bananeraie, un système faiblement mécanisé avec plantation sans travail du sol après jachère sans mécanisation des opérations d'entretien de la bananeraie. Cette note de compaction est utilisée dans le calcul du coefficient de stress de croissance, dans le calcul du coefficient de ruissellement du bilan hydrique et dans l'indicateur de risque érosif.

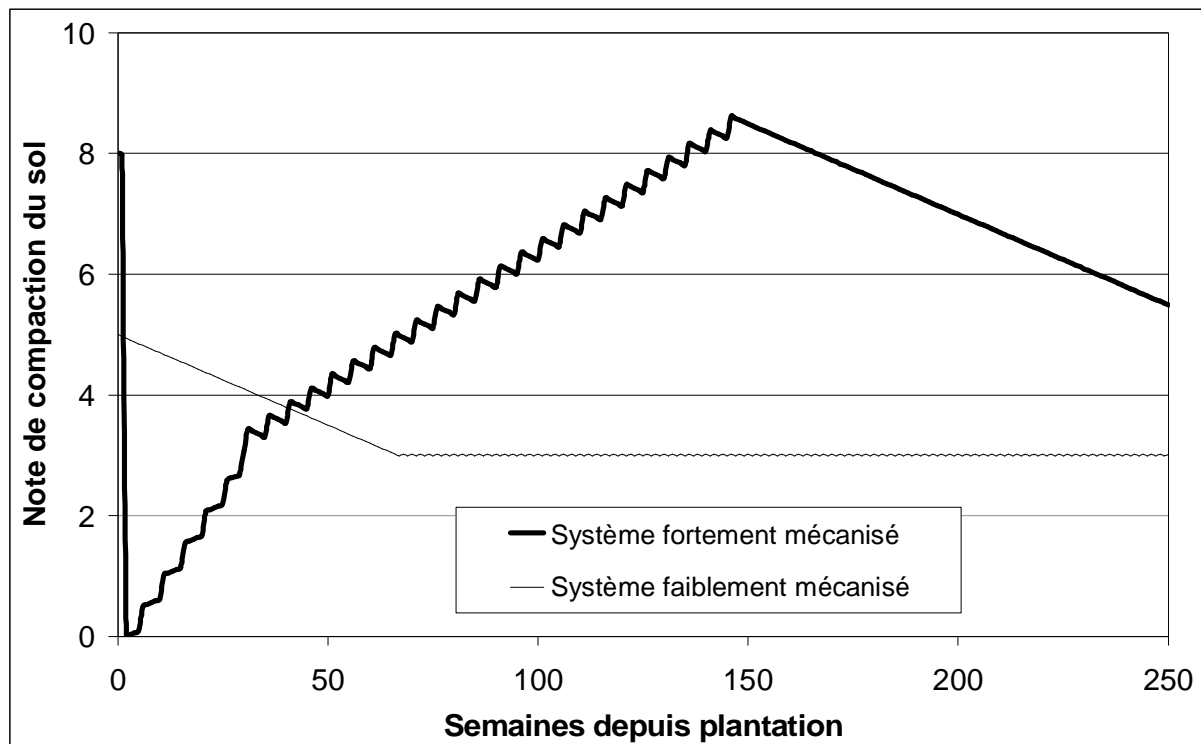


Figure II-18. Exemple de simulation de la note de compaction du sol pour 2 systèmes de culture pendant 250 semaines.

4.2.2. La couverture du sol - SIMBA-COV

La couverture du sol est une variable qui intervient dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion ; c'est un facteur du déclenchement des traitements herbicides. Le module SIMBA-COV est principalement basé sur les connaissances acquises lors de la réalisation du catalogue des états de surfaces (Tixier 2000) ainsi que sur les mesures de dynamique d'adventices réalisées principalement en Martinique (Dave, 1994).

Ce module vise à :

- évaluer le niveau de couverture du sol à chaque étape du système de culture,
- prendre en compte les pratiques de contrôle de la couverture (labours, passages d'un herbicides et gestion de la couverture morte).

SIMBA-COV est construit autour de 3 compartiments en interaction (**Figure II-19**) : le sol nu (SN), les adventices (AD) et la couverture morte (CM). Chaque compartiment représente le pourcentage du type de couverture associé, la somme de ces trois compartiments représentant 100% de la couverture. Le **tableau II-11** présente les différents processus, compartiments concernés et équations correspondants.

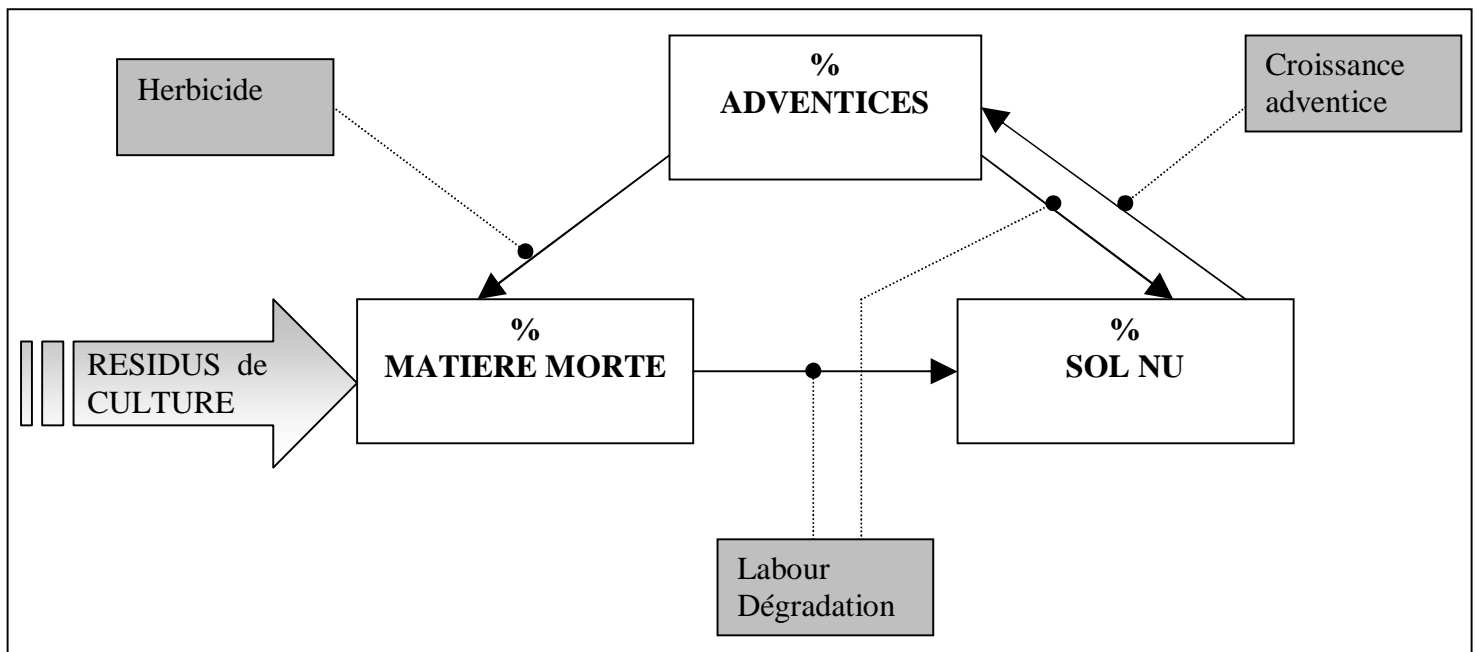


Figure II-19. Structure générale de SIMBA-COV.

Tableau II-11. Processus simulés par SIMBA-COV (SN : sol nu ; CM : couverture morte ; AD : adventices).

Phénomène / Pratique	Compartiment impliqués	Relation
Croissance des adventices	SN à AD	Eq.1.
Dégradation CM	CM à SN	Eq.2.
Apport de matière végétale morte	SN à CM	Eq.3.
Labour	CM à SN et AD à SN	100%
Passage herbicide	AD à CM	100%

Les équations 1, 2 et 3 décrivent les deux phénomènes naturels considérés dans l'évolution de la couverture du sol. La croissance des adventices (**Eq.1.**) se fait selon une croissance logistique dont le maximum correspond au pourcentage de sol nu (SN_t) et avec un taux de croissance ($r_{AD(t)}$) qui dépend du LAI de la plante de culture (réduction linéaire entre LAI=1 et LAI=5) (**Eq.1''.**). La dégradation de la matière organique morte (**Eq.2.**) se fait selon une courbe de dégradation utilisant une durée de vie de la matière organique $DT50_{CM}$ qui peut varier en fonction du type de couverture (résidus de bananier, adventices ou autre matériaux tel qu'une épaisseur donnée de bagasse). Les apports de matière organique morte (**Eq.3.**) correspondent à des résidus de culture ou à des apports extérieurs. Les apports dus aux résidus de culture se font en relation avec la dynamique des récoltes (pour le bananier). Chaque bananier récolté permet de couvrir PC_{ban} (m^2) de la surface de la parcelle simulée (1 hectare). La couverture totale du sol ($COV_{(t)}$) correspond à la somme du pourcentage de surface couverte par les adventices et du pourcentage de surface couverte par la couverture morte (**Eq.4.**).

$$\begin{aligned}
 \text{Eq.1.} \quad & \delta AD_{(t)} = (r_{AD} * AD_{(t-1)}) * (SN_{(t-1)} / (SN_{(t-1)} + AD_{(t-1)})) \\
 \text{Eq.1'}. \quad & AD_{(t)} = AD_{(t-1)} + \delta AD_{(t)} \\
 \text{Eq.1''}. \quad & r_{AD(t)} = r_{ADpot} * r_{ADcor}(LAI_{(t)}) \\
 \text{Eq.2.} \quad & \delta CM_{(t)} = (-CM_{(t-1)} / (1,5 * DT50_{CM})) + (REC_{(t)} * PC_{ban}) \\
 \text{Eq.2'}. \quad & CM_{(t)} = CM_{(t-1)} + \delta CM_{(t)} \\
 \text{Eq.3.} \quad & \delta SN_{(t)} = -\delta CM_{(t)} - \delta AD_{(t)} \\
 \text{Eq.3'}. \quad & SN_{(t)} = SN_{(t-1)} + \delta SN_{(t)} \\
 \text{Eq.4.} \quad & COV_{(t)} = CM_{(t)} + AD_{(t)}
 \end{aligned}$$

La relation entre le LAI du couvert végétal et le facteur de correction du taux de croissance des adventices ont été calibrés à partir des observations de terrain. En effet, sous un couvert de bananiers au maximum du développement de son système foliaire (LAI=4) il y a très peu de rayonnement qui traverse la canopée.

La demi-vie de la matière organique morte ($DT50_{CM}$) a été calibrée à partir d'observations de terrain.

Tableau II-12 Variables et paramètres de SIMBA-COV.

Variables	Signification	Unité
$COV_{(t)}$	Pourcentage de couverture totale du sol	(%)
$SN_{(t)}$	Pourcentage de sol nu au pas de temps 't'	(%)
$\delta SN_{(t)}$	Variation de surface de sol nu au pas de temps 't'	(%)
$AD_{(t)}$	Pourcentage d'adventice au pas de temps 't'	(%)
$\delta AD_{(t)}$	Variation de surface d'adventice au pas de temps 't'	(%)
r_{AD}	taux de croissance des adventices au pas de temps 't'	-
$r_{Adcor(t)}$	facteur de correction du taux de croissance des adventices	-
$CM_{(t)}$	Pourcentage de couverture morte au pas de temps 't'	(%)
$\delta CM_{(t)}$	Variation de surface de couverture morte au pas de temps 't'	(%)
$REC_{(t)}$	Nombre de bananier récolté au pas de temps t	nb.
$LAI_{(t)}$	LAI du peuplement simulé au pas de temps t	-
Paramètres	Signification	Unité
r_{ADpot}	taux de croissance potentiel des adventices	-
$DT50_{CM}$	demi-vie de la matière organique morte	semaine
PC_{ban}	Pourcentage de couverture par bananier récolté	(%)

Avec 't' le pas de temps du modèle

Tableau II-13 Valeurs des paramètres de SIMBA-COV

Paramètres	Valeur	Références
r_{ADpot}	0,35	Dave, 1994
$DT50_{CM}$	25 (semaines)	observations de terrain
PC_{ban}	120 (%)	observations de terrain

La **figure II-20.** présente une simulation sur le long terme de la couverture totale du sol ($COV_{(t)}$) dans un système de culture faisant intervenir un labour de désherbage au cours du premier cycle de culture puis un contrôle des adventices par herbicide avec un seuil d'enherbement de 80% ($AD_{(t)}$ est utilisé comme variable de contrôle).

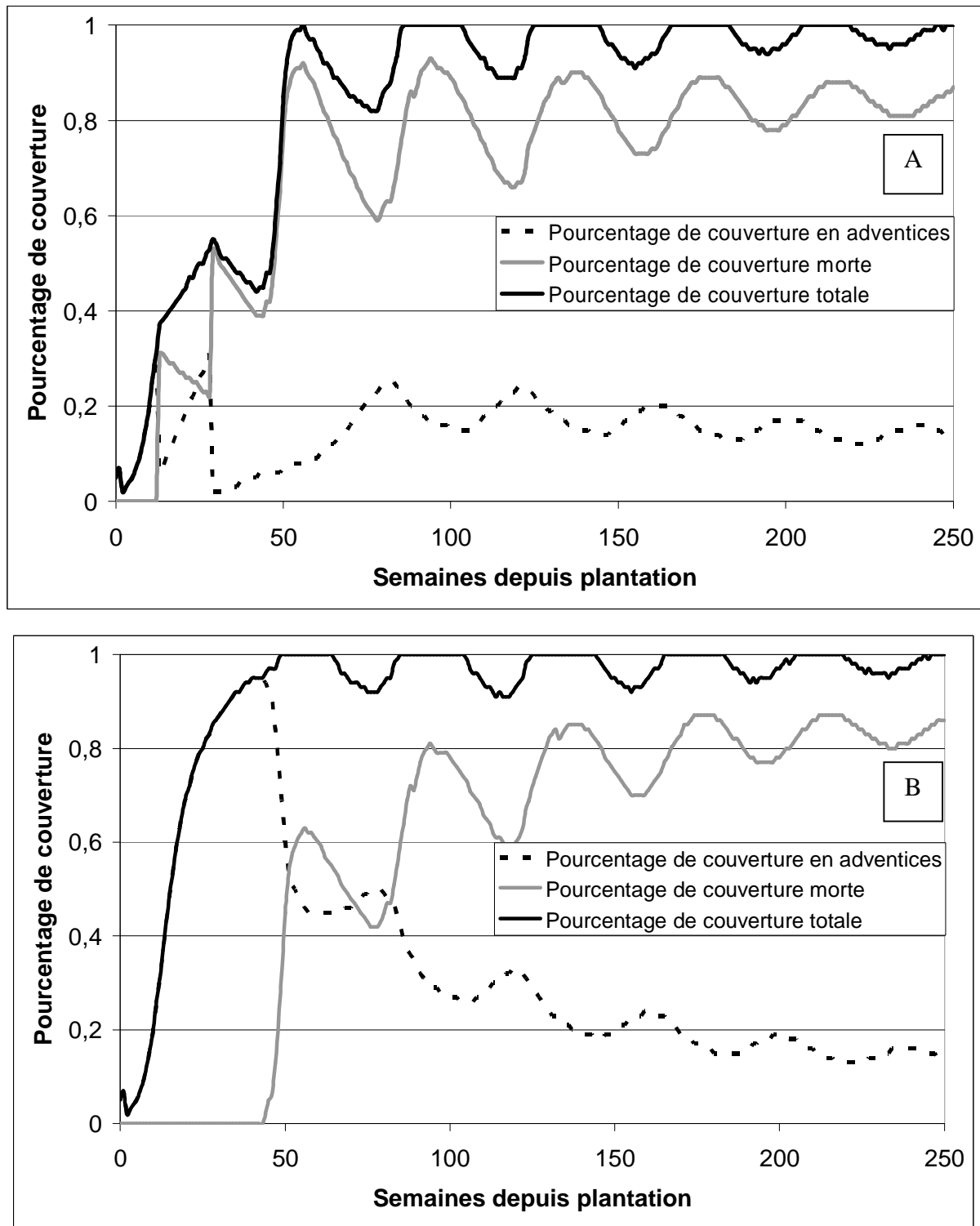


Figure II-20. Exemples de simulations pendant 250 semaines des différentes composantes de la couverture du sol (pourcentage de surface couverte par des adventices, par du mulch) dans des systèmes de culture avec une application de désherbant quand la couverture d'adventices atteint 40% (A) et sans traitement herbicide (B).

4.3. Le bilan hydrique

4.3.1. Introduction

Le bilan hydrique est un des composants des systèmes agro-écologiques qui intervient dans la plupart des phénomènes physiques et physiologiques, à travers le continuum 'sol – plante – atmosphère'. Il est important d'avoir un calcul assez précis du stock d'eau du sol pour limiter les erreurs sur les autres modules (croissance de la plante, sorties environnementales...). L'évapotranspiration, le ruissellement et le drainage sont des variables critiques utilisées notamment dans le calcul des indicateurs des risques d'érosion et de pollution des eaux par les produits phytosanitaires. Dans le cadre de la simulation des systèmes de culture sur le long terme et à un pas de temps hebdomadaire, certains compromis doivent être réalisés pour simuler des phénomènes, tel le ruissellement, se déroulant à des pas de temps plus fins tel que le ruissellement.

Il existe de nombreux modules de bilan hydrique dans les différents modèles de culture, tels que CERES, WOFOST, SWAP, STICS, SUCROS (Eitzinger et al. 2004 ; van den Berg et al., 2002). Des modèles de bilan hydrique plus spécifiques existent, comme celui développé par Vaksman (1988) sur les andosol de la Réunion. Le pas de temps de la plupart de ces modèles est journalier. Le module de bilan hydrique SIMBA-WAT a été développé en intégrant les connaissances acquises relatives au ruissellement, au drainage et au fonctionnement hydrologique global des systèmes bananiers.

4.3.2. Structure du module

Le module SIMBA-WAT fonctionne selon 3 étapes :

- le calcul de l'évapotranspiration,
- le calcul de la répartition de l'eau (précipitation ou irrigation) dans les différents compartiments (plante, sol, surface, profondeur),
- le calcul du bilan global et des paramètres hydriques du sol.

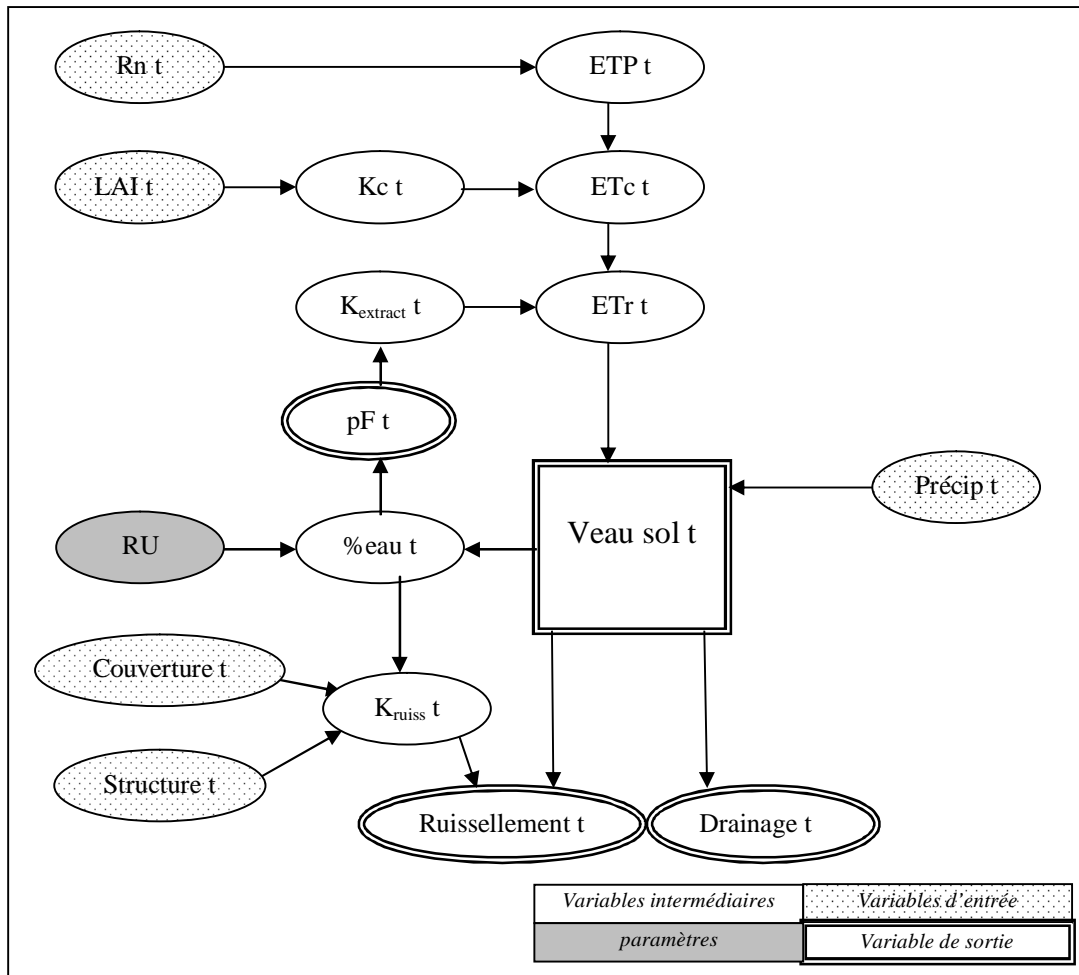


Figure II-21 Schéma global de SIMBA WAT.

Le processus de l'évapotranspiration a été abordé par de nombreux auteurs, y compris aux Antilles (Schoch et al., 1975). La quantité d'eau évaporée est calculée selon l'équation simplifiée de Penmann-Monteith qui utilise le rayonnement comme entrée:

$$ETP_t = (0.2392 * Rn_t) - 0,0026$$

Avec les variables et paramètres :

ETP_t L'évapotranspiration (hebdomadaire) potentielle au pas de temps t
 Rn_t Le rayonnement moyen au pas de temps t

Le calcul de l'évapotranspiration de la culture (ET_{c,t}) se fait en multipliant l'évapotranspiration de référence (ETP t) par un coefficient cultural (Kc t).

$$ET_c t = ETP t * Kc t$$

Le coefficient cultural K_c est estimé pour le bananier entre 0.5 et 1.2 (Santana et al., 1993 ; FAO, 1998) (**Figure II-22**).

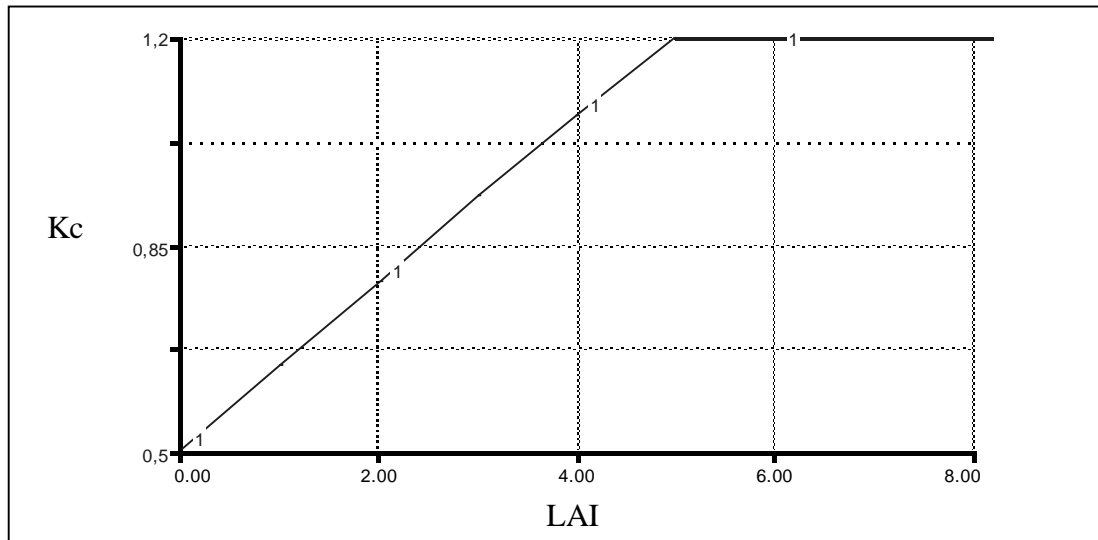


Figure II-22. Variation du coefficient cultural (K_c) en fonction du LAI du couvert.

L'eau réellement évaporée est calculée en fonction d'un coefficient relatif à la capacité de l'eau à être extraite du sol, ce coefficient (K_{extract}) est relatif à l'état de l'eau dans le sol (pF). La **figure II-23** présente ce coefficient en fonction du pF.

L'eau réellement évaporée est calculée selon l'équation :

$$ET_r t = ET_c t * K_{\text{extract } t-1}$$

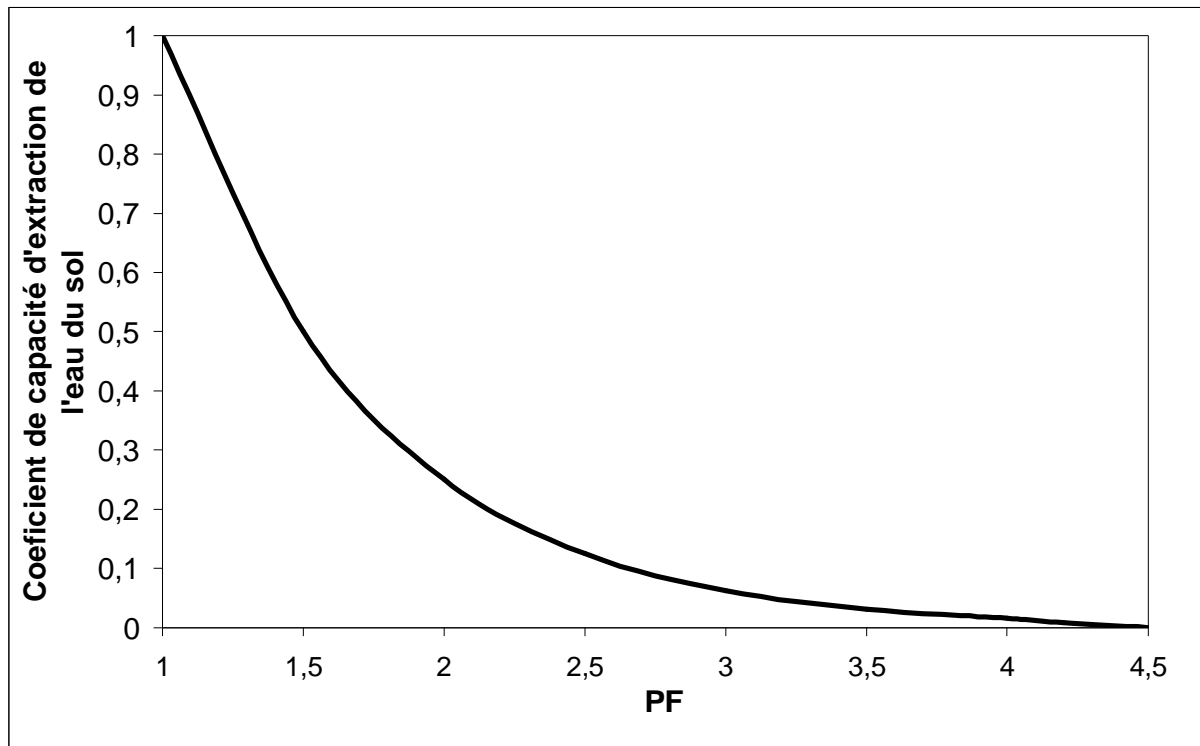


Figure II-23. Relation entre le coefficient de capacité d'extraction de l'eau du sol en fonction du potentiel hydrique (pF) d'après les connaissances sur le fonctionnement des andosols de Guadeloupe acquises par Dorel (2001).

La seconde étape de calcul dans le module SIMBA-WAT est la répartition de l'eau dans les différents compartiments de l'environnement. Le compartiment sol est considéré comme un réservoir unique alimenté par les précipitations nettes (interception feuillage et ruissellement). Ce stock est vidé par l'évapotranspiration réelle. Un coefficient de ruissellement dépendant du stock d'eau, de la structure et de la couverture du sol permet de calculer un volume d'eau ruisselé qui ne participe pas au remplissage du stock du sol. Le volume d'eau drainé correspond à la variable finale du bilan.

Un coefficient d'interception du feuillage a été défini comme étant dépendant du LAI et de la répartition des précipitations dans le temps. Il a été considéré que 1 millimètre de pluie est intercepté par semaine et par unité de LAI. Cette simplification sous-estime probablement l'interception foliaire dans le cas de multiples petits événements pluvieux. Un coefficient de ruissellement est calculé de manière empirique (Catalogue états de surface ; Tixier, 2000) et prend en compte la structure du sol (note de compaction du sol), la couverture du sol (% de couverture) et le niveau de l'eau dans le sol. Ces 3 variables viennent pondérer un coefficient

de ruissellement potentiel qui est de 0.07. Le tableau suivant présente les trois variables et le facteur de pondération du coefficient de ruissellement associé à leur gamme de variation. Le **tableau II-14** présente les facteurs de correction du coefficient de ruissellement ainsi que les variables qui les pilotent.

Tableau II-14. Facteurs de correction du ruissellement, variable de pilotage et gamme de variation associée.

Variables	Limite inférieure	Limite supérieure	Fonction
% couverture	0 à 1	100 à 0.3	Linéaire
note_compaction_sol t-1	0 à 0.3	10 à 1	Linéaire
% eau sol t-1	0 à 0.3	100 à 1	Linéaire

Les précipitations nettes sont ajoutées à la réserve en eau du sol. L'évapotranspiration et l'eau stockée dans la biomasse fraîche produite au pas de temps 't' sont soustraite de cette réserve. Si la réserve en eau est pleine, l'excédent des précipitations nettes est considéré comme drainé. Le bilan global permet de calculer le volume drainé et le volume en eau du sol.

$$\text{Drainage}(t) = \text{Précipitation}(t) - \text{Interception}(t) - \text{Ruissellement}(t) - \text{ETr}(t) \\ - (\text{RU} - \text{StockEauSol}(t-1))$$

$$\text{StockEauSol}(t) = \text{StockEauSol}(t-1) + \text{Précipitation}(t) - \text{Interception}(t) - \text{Ruissellement}(t) \\ - \text{ETr}(t) - \text{Drainage}(t)$$

La réserve utile en eau du sol est calculée sur la couche de sol potentiellement colonisable par les racines et en fonction de la porosité. La porosité considérée comprend tous les diamètres de pores (de la macro à la micro porosité) ; elle est égale à 0,73 pour les andosols de Guadeloupe (Dorel 2001).

$$\text{RU} = \text{épaisseur sol} * \text{porosité}$$

Il est possible de calculer en fonction du stock d'eau dans le sol un potentiel hydrique, à partir de la courbe définie par Dorel (2001) qui relie la teneur en eau (indice relatif d'eau dans le sol ; ce qui correspond au pourcentage d'eau dans le sol) au potentiel hydrique (**figure II-24**).

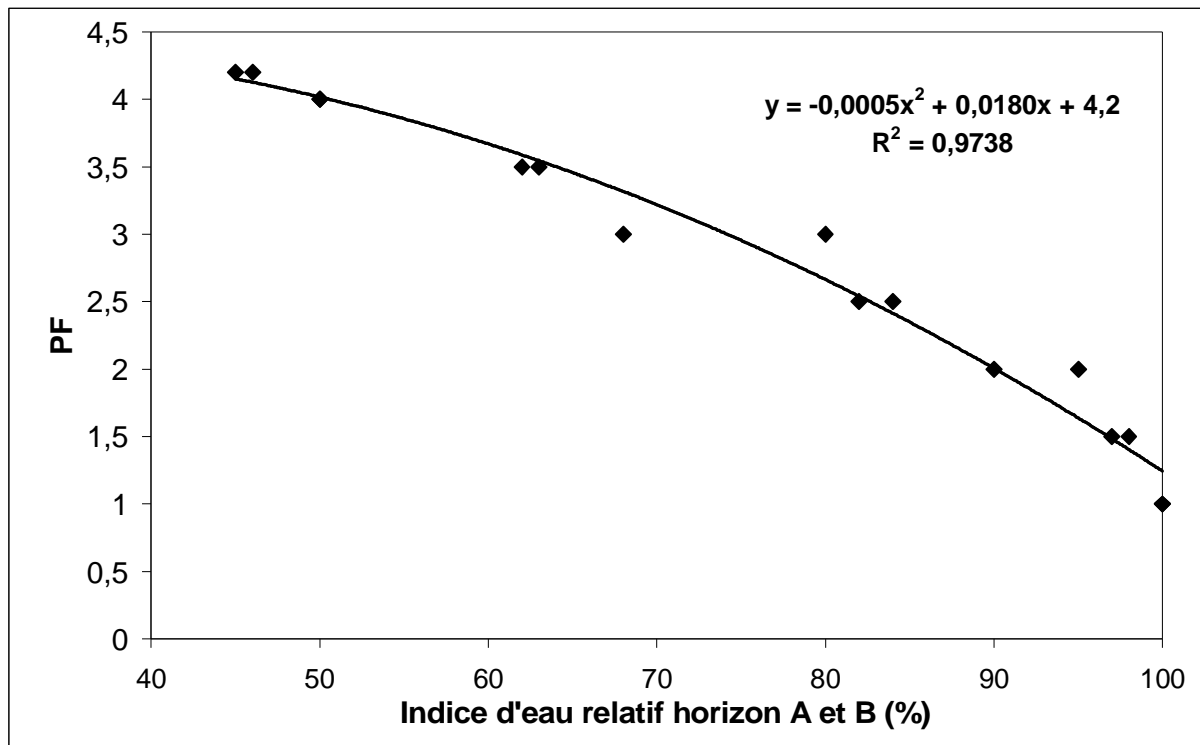


Figure II-24. Relation entre le potentiel hydrique (pF) et l'indice relatif d'eau dans un andosol pour les horizons A et B (%) d'après Dorel (2001).

4.3.3. Validation

La validation du module SIMBA-WAT a été réalisée en comparant les valeurs mesurées et simulées du potentiel hydrique (pF) d'une parcelle, les simulations ont été réalisées en utilisant les données météorologiques de la période considérée (**figure II-25**). Cette figure nous montre que SIMBA-WAT est capable de détecter correctement les périodes de dessèchement du sol. Il y a cependant un petit retard pour la première période sèche. Au cours de cette simulation il n'y a pas eu de période de sécheresse très importante, ce qui présente une limite à la validation de ce module.

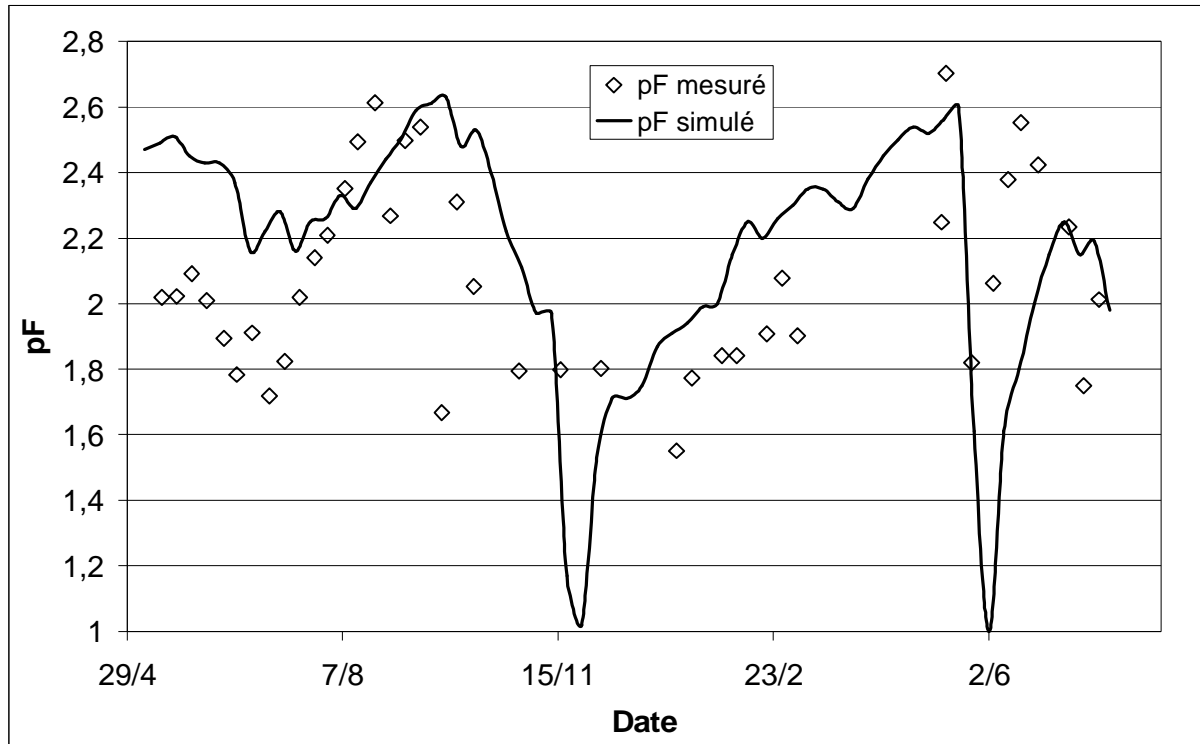


Figure II-25- Potentiel hydrique simulé et potentiel hydrique mesuré en fonction du temps pour une parcelle de faible altitude (exploitation Dormoy, parcelle Purgerie3, mesures du 07/05/2003 au 31/07/2004).

4.4. La dynamique des nématodes phytoparasites SIMBA-NEM (article)

Le module SIMBA-NEM a fait l'objet d'un article soumis en juillet 2004 à la revue *Ecological Modelling*. Cet article présente les concepts, la structure et des applications de ce module. La modélisation de la contrainte parasitaire est un des points importants des modèles de culture actuels sur lequel il reste à innover. Certains modèles spécifiques intègrent cette composante (Wilocquet et al., 2000) mais ce n'est généralement pas le cas des modèles de culture dit 'génériques'. Ce module est par ailleurs central dans la problématique des systèmes de culture bananiers compte tenu de l'importance de ce facteur limitant.

Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes: a contribution to the design of sustainable cropping systems

Tixier¹ P., Risède¹ J.-M., Dorel¹ M., Malezieux² E.

¹ CIRAD-Filhor, 97130 Capesterre – Guadeloupe, French West Indies, France

Tel.: + 33 (0)5 90 41 36 87

Fax: + 33 (0)5 90 86 80 77

E-mail address: tixier@cirad.fr

² CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier Cedex 5, France.

Tel.: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

Corresponding address

CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier Cedex 5, France.

Tel.: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

Abstract

In this paper, we present the biological background, the model-building methodology and some applications of SIMBA-NEM, a new model to simulate the population dynamics of two major phytoparasitic nematode species of banana, i.e. *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae*. Generations of both nematode species are represented by successive cohorts. Population growth is taken into account by a logistic function whose environmental carrying capacity (K) depends on the available banana root biomass and on the respective populations of competitive species. Soil water content and quantity of nematicides used are considered to be the main variables influencing the intrinsic population growth rate of each species. SIMBA-NEM was calibrated and validated using datasets concerning banana cropping systems in Guadeloupe (FWI). An analysis of the sensitivity of the model to the main parameters and validation simulations for various cropping systems (banana monoculture with or without use of nematicides and a banana/sugarcane rotation) enabled us to test the robustness of the model. SIMBA-NEM can predict long-term nematode population patterns over time while taking interspecific competition into account. It also helps to define the knowledge gaps in nematology and modelling.

Keywords: nematodes; banana cropping system; population model; *Radopholus similis*; *Pratylenchus coffeae*; *Musa* spp., AAA group

1. Introduction

As in many intensive agrosystems, banana monocultures in French West Indies (FWI) are hampered by major parasitic factors (phytoparasitic nematodes, insect pests and soilborne fungi) that seriously threaten the sustainability of these systems (decreased yield, banana plant fall, intensive pesticide use). In these regions, nematode parasitism is characterised by high biodiversity of the populations, with various levels of affinity and harmfulness to the banana hosts (Gowen and Quénéhervé, 1990). According to the authors, *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae* are phytoparasitic nematodes that generate extensive root lesions, and they are considered to be among the most detrimental pathogens of banana. They induce decreases in yield mainly by toppling of banana plants due to root necrosis, and to a lesser extent to trophic effects. In F.W.I. as in other banana producing countries, nematode management was until the last decade mainly based on the use of nematicides, a practice that can have a very detrimental effect on the environment (Bonan and Prime, 2001). Crop rotations have recently been introduced to temporarily reduce the inoculum by removing the host plant (banana), which is replaced by non-host or poor host plants. These techniques are efficient but still need to be improved and tailored to farmers' economic potential.

Cropping system models such as CROPSYST (Stöckle et al., 2003) or STICS (Brisson et al., 1998) give rise to new simulation approaches because many biophysical variables of the system are simulated, e.g. soil characteristics or biomass of various crop organs. However parasitism is rarely taken into account in these models, although it is a key point for the agronomic, ecological and economic sustainability (Kropff et al., 1995). Most often however, pest progress over time is simply introduced as a forcing function (van Ittersum et al., 2003).

In current intensive agrosystems, knowledge on the cultivated crops and associated parasites is essential to understand the parasite population dynamics and forecast their potential patterns in order to draw up an efficient pest management programme. The development of a disease in an agrosystem can be considered as an interaction between a host and a parasite population (Savary, 1994), and this interaction is influenced by climatic factors and cropping practices. Pathosystem studies should first define and hierarchize these interactions. Pest and host population models help to formalize and quantify these interactions and define the dynamic aspects. The main aim of these models is to simulate the effects of pests on the crop, as done by Colbach and Huet (1995) who modelled the frequency and severity of root and

foot diseases in winter wheat monocultures. Phytoparasitic nematode populations and their damages have been simulated on potato by Ehwaeti et al. (2000), where an initial population, growth rate and maximal population were used to predict the final population after one crop cycle. Generally, simulation of an organism whose life cycle is characterised by different developmental stages, such as insects (Deaton et al., 2000), and requires the use of 'partial life models' or more complex models like 'matrix models' (Oli, 2003). Cohort models are usually used to represent the population dynamics of organisms that have different developmental stages (Hannon and Matthias, 1999).

This paper presents the development of SIMBA-NEM, a model aimed at simulating banana phytoparasitic nematode population dynamics at the field scale in relation with environmental factors, banana root systems and cultural practices. This model is linked to SIMBA, a cropping system model (not describe here) that simulates plant growth, banana population structure (Tixier et al., 2004), water balance and soil structure parameters. This work enabled the formalisation of nematological knowledge relative to banana systems and its integration in a global field scale model.

2. Biological background and model construction hypothesis

2.1 Biology and life cycle of banana phytoparasitic nematodes

In FWI, banana crops are hampered by serious biotic constraints, among which soilborne parasites. These ones involve a root parasites complex that includes phytoparasitic nematodes and soilborne fungi, such as the primary parasite *Cylindrocladium spathiphylli* (Risède, 2004). Plant parasitic nematodes attack the banana root system at the same time and constitute a community of multiple species with different biology and pathogenicity. Within these communities, phytoparasitic nematodes that induce lesions are the most damaging, including *Pratylenchus coffeae* and especially *Radopholus similis*, which is considered to be the most abundant species in FWI and the most detrimental for banana crops (Sarah, 1993). Phytoparasitic nematodes perforate the pecto-cellulosic wall of root tissues of their host with a retractile stylet. Endoparasitic nematodes such as *R. similis* and *P. coffeae* enter the root cortical parenchyma, where they settle in an intercellular position (Gowen and Quénehervé, 1990). Most of their lifecycle occurs inside the root tissues. This cycle includes one egg stage,

four larval stages and finally one adult stage. In Pratylenchidae species like *P. coffeae* or *R. similis*, females lay eggs about 3 weeks after their own egg stage, but this period is longer if the temperature and humidity conditions are not favorable (Gowen and Quénehervé, 1990).

The effects of phytoparasitic nematodes that produce lesions on their host depend on the type of species and their abundance. Root cell lesions induced by nematode penetration and development can lead to macroscopic necrosis that deteriorates the root functions. The worst consequence is the loss of the plant's soil anchoring capacity due to breakage of damaged roots, which can lead to plant fall. Necrosis can also have deleterious trophic effects such as a reduction in plant growth and extension of the vegetative period due to the reduction in the root efficiency of water and mineral uptake and transport (Seinhorst, 1981; Gowen and Quénehervé, 1990; Fogain, 2000).

Little information is available about the true length of the nematode lifecycle. However, on the basis of laboratory observations, phytonematologists estimate that it takes approximately 6 weeks (Quénehervé, personal communication). We will thus assume that the studied nematodes are mature after 3 weeks post-hatching (**Hypothesis 1**) and that the length of their lifecycle is 6 weeks (**Hypothesis 2**).

2.2 Evolution of a banana population in the field. Nematode / root interactions

Banana (*Musa* spp., AAA group, cv. Cavendish Grande Naine) are herbaceous perennials whose root system is characterised by an underground rhizome from which adventitious roots and axillary buds grow (Turner, 1994). Roots mainly grow laterally, few having a vertical growth (Champion and Sioussaram, 1970). Axillary buds of the rhizome develop in lateral suckers. The roots dynamic is characterised by successive flushes (Lavigne, 1987) in relation with the shoot phenology. New roots are emitted until the flowering stage of the mother plant (Beugnon and Champion, 1966). Sucker roots are present and develop at the same time as those of the mother plant. In production conditions, generally only one sucker is selected by mat (others are destroyed) and will become the mother plant of the next cropping cycle. Depending on the sucker selection conditions (early or late), the number of suckers present at a given period of the cropping cycle may differ, hereby influencing the overall banana root dynamics. The growth rate of banana roots is dependent on the soil physical and chemical properties, their ages and the root type (primary roots grow fast, secondary roots grow

slower), the rate ranges from 1 to 5 cm/day (Lecomte, 2002). The spatial structure of the root system is also dependent on the physical and chemical properties of the soil (Delvaux and Guyot, 1989; Lecomte, 2002). The root biomass of banana varies over time and depends on soil conditions and cultural practices (sucker selection).

In addition to per-plant temporal variations, inter-plant variations at the field scale have to be taken into account. Heterogeneity with respect to plant developmental stages increases with time after planting. Individuals that form the field population are not synchronised and after few cropping cycles all developmental stages can be present at the same time (Lassoudière, 1980). Physiological (root emission and growth), cultural (sucker selection) and structural (heterogeneity of developmental stages in a field) processes should be integrated so as to describe the root dynamics at the field scale into account.

In relation with banana root dynamics, Quénéhervé, 1989^{a,b} and Sarah, 1986 have shown that *Radopholus similis* and *Helicotylenchus multicinctus* nematode populations on a banana plant can vary over time as a function of the phenological stage of the mother plant, i.e. nematode populations grow until flowering, and then are stable during inflorescence development and decrease after bunch harvest. Nematode populations can be controlled by chemical destruction of rotting roots (Mateille et al., 1984). It could thus be concluded that the phytoparasitic nematode carrying capacity of a field depends on the total root biomass of the field (**Hypothesis 3**).

Banana roots infected by phytoparasitic nematodes currently develop lesions and the degradation of root tissues increases the susceptibility of the plant to other organisms of the soil parasites complex, especially soilborne fungi (Loridat, 1989). The compatibility and pathogenicity of a parasitic nematode for its host can vary among banana varieties, nematode species and biotypes (Sarah, 1993; Fogain and Gowen, 1995). Hugon and Picard (1988) demonstrated the infestation, exploitation and destruction behavior patterns of nematodes inside a banana root. Nematodes penetrate into the root mainly within 10-40 cm behind the tip of the root, with a preference for injured zones and secondary root emission zones (cortical parenchyma lesions). The abundance of penetrations is also linked to the spatial distribution of nematode inocula in soil, thus accounting for the heterogeneity of infested zones. Some authors (Hugon and Picard, 1988) have demonstrated that the most infested zones within a root are not those showing the most visible necrotic symptoms but rather their neighbouring

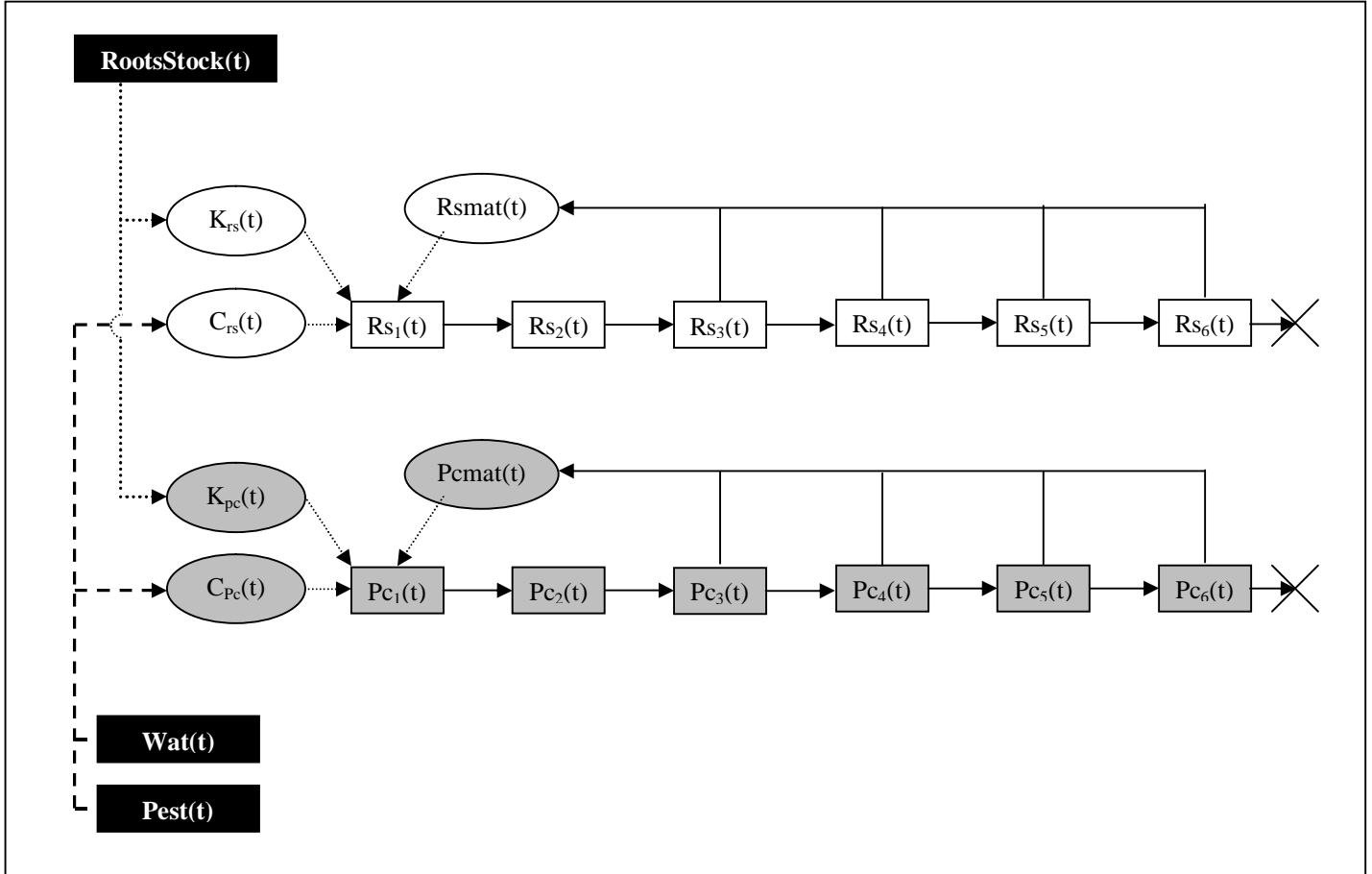
zones that still appear healthy. This is explained by the short-range (millimeters) displacement of nematodes in roots. This also confirms that highly degraded roots are not used as a nutritional resource by plant parasitic nematodes. In addition, it underlines the obligatory parasite status of these nematodes, which live and reproduce at the expense of living organic matter. Interspecific competition between phytoparasitic nematodes has been documented for different plant species (Duncan and Ferris, 1982; Shoener, 1983; Cadet and Debouzie, 1990; Umesh et al., 1994). For banana, Quénéhervé (1989^a) obtained evidence of this competition with respect to *Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*, *Helicotylenchus multicinctus* and *Hoplolaimus pararobustus*. Competition for the resource (feeding site) between these species leads to exclusion through deterioration of the quality of the resource by other species. It is widely acknowledged that phytoparasitic nematode biodiversity is a consequence of the cultivation history (forest, sugarcane or banana). Phytoparasitic nematode species can be considered as being in competition for the banana root resource (**Hypothesis 4**).

Studies of *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae* dynamics reported in the literature (Ganry, 1978^a; Hugon et al., 1984; Fargette and Quénéhervé, 1988; Quénéhervé, 1988; Quénéhervé, 1989^{abc}; Simon, 1991) confirm that phytoparasitic nematodes of banana have population growth that follows logistics functions (**Hypothesis 5**). These dynamics can be characterised by an environmental carrying capacity 'K' that is dependent on the root resource, the population of species in competition and the intrinsic growing rate 'c' specific to each species.

2.3 Influence of pedoclimatic factors on phytoparasitic nematode population dynamics

Although the roots can be considered as a protected (buffered) area for endoparasitic nematodes, environmental factors such as pedological factors (soil texture and organic matter content) and soil climate (water content and temperature) were shown to influence the dynamics of these nematodes (Hugon et al., 1984; Quénéhervé, 1988; Quénéhervé, 1989^{abc}). Fargette and Quénéhervé (1988) and Quénéhervé (1988) showed that variations in soil texture generate significant variations in nematode dynamics, and light soil textures seem to promote nematodes growth. Quénéhervé (1988) explained this textural effect on the basis of soil water content, which seems to be the most significant factor. This was also confirmed by

Fig. 1. Structure of the SIMBA-NEM model. With at each time step 't' of the model for each species, $R_s(i)(t)$ and $P_c(i)(t)$ representing the nematode number in the 'i' cohort, $R_{smat}(t)$ and $P_{cmat}(t)$ the number of mature nematodes, $K_{rs}(t)$ and $K_{pc}(t)$ the carrying capacity, $c_{rs}(t)$ and $c_{pc}(t)$ the population growth parameter and $RootsStock(t)$, $Wat(t)$ and $Pest(t)$ the banana fresh root biomass, percentage of soil water and soil nematicide quantity, respectively.



Quénéhervé (1989^{a b c}), Hugon et al. (1984), Vilardebo (1984) and Mateille et al. (1988), who showed that the soil water content is an important negative factor for nematode survival during periods of drought or excess water. Soil water content influences plant parasitic nematode dynamics, i.e. over or under an optimal water content level the nematode population growth rate decreases (**Hypothesis 6**).

2.4 Nematicides action on nematode populations

In intensive cropping conditions, nematode populations are mainly controlled by nematicide treatments (organophosphates and carbamates). These products have various effects on nematode physiology, i.e. they reduce reproduction (Cavelier, 1987; Berge, 1980) and limit nematode penetration into the roots. We can assume that the quantity of nematicide in the soil has a direct influence on the intrinsic growth rate of phytoparasitic nematodes (**Hypothesis 7**).

3. Material and Methods

3.1 Model description

The structure of the model is based on a representation of nematode developmental stages by cohorts (**Fig. 1**). A cohort represents a pool of individuals at the same age in number of weeks. Successive cohorts are linked to each other and form a cohort chain that describes all generations of the simulated species. Variables and equations of the model are presented on **Tables 1 and 2**. At the field scale, *Radopholus similis* (Rs) and *Pratylenchus coffeae* (Pc) populations are characterised by two cohort chains that allow the description of their different generations. SIMBA-NEM runs on a weekly time step. The first cohort contains individuals of less than 1 week old. The model is based on 6 cohorts because all individuals die after 6 weeks. Mature individuals (cohorts 3, 4, 5 and 6 of each population) produce eggs that increment the first cohort. Egg production follows a logistic function (Eq. 4'' et 5''), and is characterised by the 'K' carrying capacity (maximal number of nematodes) and 'c' growth rate. The global environmental carrying capacity for the two species is directly linked to the resource, i.e. the banana root biomass (Eq. 1). The carrying capacity of each species (K_{rs} and K_{pc}) is related to the global carrying capacity (K_{tot}) and to the total number of nematodes of

Table 1. Variables and parameters of the SIMBA-NEM model, where 't' is the model time step and 'i' is the cohort rank.

Input variables	Meaning
RootsStock(t)	Banana root fresh biomass at step t (g.ha^{-1})
Wat(t)	Percentage of water in soil (%) at step t
Pest(t)	Quantity of nematicide active product in soil (g.ha^{-1})
$Rs_{(1)}(1)$; $Pc_{(1)}(1)$	Initial inoculum for Rs, and Pc (nb.ha^{-1})
Output variables	Meaning
$K_{\text{nem}}\text{pot}(t)$	Number of potential nematodes at step t per hectare (nb.ha^{-1})
$K_{rs}(t)$; $K_{pc}(t)$	Specific carrying capacity at step t per hectare (nb.ha^{-1})
$C_{rs}(t)$; $C_{pc}(t)$	Growth rate at step t for Rs and Pc
$C_{rs}\text{pot}$; $C_{pc}\text{pot}$	Intrinsic growth rate for Rs and Pc
$FX_{\text{pest}}(t)$	Nematicide effect at step t
$FX_{\text{wat}}(t)$	Soil water content effect at step t
$Rs_{(i)}(t)$; $Pc_{(i)}(t)$	Number of nematodes in cohort i at step t per hectare for Rs and Pc (nb.ha^{-1})
$R\text{smat}(t)$; $P\text{cmat}(t)$	Total number of mature nematodes at step t per hectare for Rs and Pc (nb.ha^{-1})
$R\text{stotal}(t)$; $P\text{ctotal}(t)$	Total number of nematodes at step t per hectare for Rs and Pc (nb.ha^{-1})
$Rs(t)$; $Pc(t)$	Number of nematodes per gram of root at step t for Rs and Pc (nb.g^{-1})
Parameters	Meaning
$K_{\text{nem}}\text{Max}$	Maximal carrying capacity per gram of root (nb.g^{-1})
$C_{rs}\text{pot}$; $C_{pc}\text{pot}$	Intrinsic growth rate for Rs and Pc
a_{pest} , b_{pest}	Parameters of the $FX_{\text{pest}}(t)$ curve
a_{wat} , b_{wat} , c_{wat}	Parameters of the $FX_{\text{wat}}(t)$ curve

With 'i' the number of the cohort and 't' the step of the model ; Rs for *Radopholus similis* and Pc for *Pratylenchus coffeae*

Table 2. Equations of the SIMBA-NEM model, where 't' is the model time step and 'i' is the cohort rank.

Equations	Equation number
$K_{nem}pot(t) = RootsStock(t) * K_{nem}Max$	Eq. 1
$K_{rs}(t) = K_{nem}pot - Pctotal(t-1)$	Eq. 2
$K_{pc}(t) = K_{nem}pot - Rstotal(t-1)$	Eq. 2'
$C_{rs}(t) = C_{rs}pot * FX_{pest}(t) * FX_{wat}(t)$	Eq. 3
$C_{pc}(t) = C_{pc}Pot * FX_{pest}(t) * FX_{wat}(t)$	Eq. 3'
$Rstotal(t) = Rs_1(t) + Rs_2(t) + Rs_3(t) + Rs_4(t) + Rs_5(t) + Rs_6(t) = \sum^n Rs_{(i)}(t)$	Eq. 4
$Rsmat(t) = Rs_3(t) + Rs_4(t) + Rs_5(t) + Rs_6(t)$	Eq. 4'
$Rs_1(t) = (C_{rs}(t) * Rsmat(t-1)) * ((K_{rs}(t) - Rstotal(t-1)) / K_{rs}(t))$	Eq. 4''
$Rs_{(i)}(t) = Rs_{(i-1)}(t-1) \text{ (pour } i > 1 \text{)}$	Eq. 4'''
$Pctotal(t) = Pc_1(t) + Pc_2(t) + Pc_3(t) + Pc_4(t) + Pc_5(t) + Pc_6(t) = \sum^n Pc_{(i)}(t)$	Eq. 5
$Pcmat(t) = Pc_3(t) + Pc_4(t) + Pc_5(t) + Pc_6(t)$	Eq. 5'
$Pc_1(t) = (C_{pc}(t) * Pcmat(t-1)) * ((K_{pc}(t) - Pctotal(t-1)) / K_{pc}(t))$	Eq. 5''
$Pc_{(i)}(t) = Pc_{(i-1)}(t-1) \text{ (pour } i > 1 \text{)}$	Eq. 5'''
$Rs(t) = Rstotal(t) / RootsStock(t)$	Eq. 6
$Pc(t) = Pctotal(t) / RootsStock(t)$	Eq. 6'
$FX_{pest}(t) : \begin{cases} \text{if } Pest(t) > a_{pest} \\ \text{then } b_{pest} \\ \text{else } ((b_{pest}-1) / a_{pest}) * Pest(t) + 1 \end{cases}$	Eq. 7
$FX_{wat}(t) : \begin{cases} \text{if } Wat(t) < a_{wat} \\ \text{then } (((1-b_{wat})/a_{wat}) * Wat(t)) + b_{wat} \\ \text{else } (((1-c_{wat})/(a_{wat}-1)) * Wat(t)) + (c_{wat}-((1-c_{wat})/(a_{wat}-1))) \end{cases}$	Eq. 7'

The variables and parameters are described in Table 1.

other species (Eq. 2 and 2'). The growth rate 'c' of each species is calculated at each step of the model using the intrinsic growth rate of each species ($c_{rs\text{pot}}$ and $c_{pc\text{pot}}$) and correction factors relative to the soil water content and the quantity of nematicides in the soil) (Eq. 3 and 3'). The total population of nematodes is calculated in Eq. 4 and 5. The logistic growth patterns corresponding to new individuals (eggs) are presented in Eq. 4'' and 5''. The passage of individuals from cohort i to cohort $i+1$ is described in equations 4''' and 5'''.

The nematicide effect on growth rates ($c_{rs}(t)$ and $c_{pc}(t)$) is accounted for through a corrective factor ranging from 0 to 1 ($FX_{\text{pest}}(t)$) and that follows a curve whose parameters are a_{pest} and b_{pest} (Eq.7). The parameter a_{pest} defines the nematicide quantity at which the effect is maximal, and b_{pest} defines the maximal reduction factor of the growth rates. The soil water content effect on the growth rates is accounted for through a corrective factor ranging from 0 to 1 ($FX_{\text{wat}}(t)$) and that follows a curve whose parameters are a_{wat} , b_{wat} and c_{wat} (Eq.7'). The parameter a_{wat} defines the optimal soil water content, b_{wat} and c_{wat} are, respectively, the maximal corrections for minimal and maximal soil water content (drought and water excess). **Fig. 2** presents the $FX_{\text{pest}}(t)$ and $FX_{\text{wat}}(t)$ curves for nematicide stock and soil water content variations, respectively.

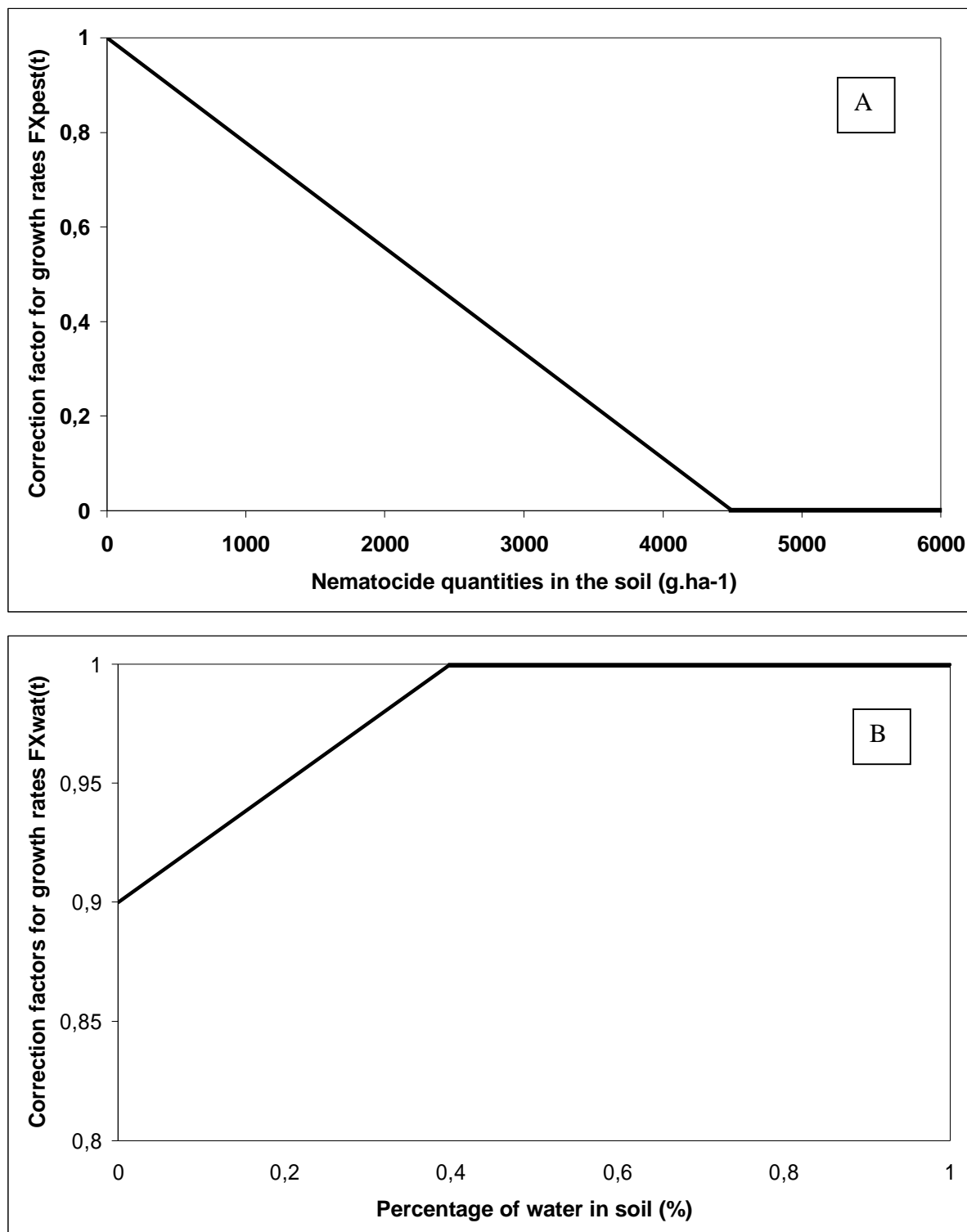
3.2. Experimental data

Data used for calibration and validation of SIMBA-NEM are derived from experiments conducted to test the efficacy of nematicides in Guadeloupe (FWI) between 1974 and 2004 (**Table 3**). Enumeration of each species of root phytoparasitic nematodes after extraction by the centrifugation-flotation method (Coolen et d'Herde, 1972). Nematode populations are expressed in number of nematodes per gramme of fresh root biomass. The intervals between measurements ranged from 1 week to 1 month. Datasets without nematicide applications allowed calibration of the model in optimal conditions whereas datasets with nematicides allowed to calibrate the effects of a nematicide application.

3.3. Method of calibration

Parameters calibration was done separately for each nematode species. The nematicide and soil water content effects were subsequently calibrated. Datasets were used separately and

Fig. 2. Correction factors for growth rates c_{rs} and c_{pc} : $FX_{pest}(t)$ (Fig. 2A) and FX_{wat} (Fig. 2B) relative to the quantity of active substance of nematicides in soil and the percentage of water in soil in the cultivated layer, respectively.



then all parameters were compared to obtain a calibration that was representative of the pedoclimatic situation.

The parameters and initial data used by SIMBA-NEM are presented in **Table 1**. For each dataset the initial inoculum of each species ($Rs_{(1)}(1)$ and $Pc_{(1)}(1)$) was fixed to the first data of the dataset. The carrying capacity ($K_{nem\text{pot}}$) was calibrated using the maximal value of each dataset. The intrinsic growth rates were calibrated using a dynamic statistical adjustment in order to reduce the mean square error between measured and simulated data, they were calibrated separately for each species (in monospecific situations). The curve parameters of the nematicide correction factor (a_{pest} and b_{pest}) and of the soil water content effect (a_{wat} , b_{wat} and c_{wat}) were also calibrated using a dynamic statistical adjustment to reduce the mean square error between measured and simulated data.

4. Results and Discussion

4.1. Model calibration

Table 4 presents the mean and standard deviation for all parameters of SIMBA-NEM. The standard deviation is relatively high for the intrinsic growth rates (c_{rs} and c_{pc}), which could be explained by the high variability in the measured values in similar conditions. The absence of repetitions and the difficulty to obtain data considerably handicap studies on nematode population dynamics. This variability, however, is not incompatible with the goals of the model, i.e. to give an instantaneous order of magnitude of nematode infestation and study the nematode population dynamics. In addition, this variability is not any greater than that generally observed between measurements in similar conditions.

4.2. Validation of SIMBA-NEM for two pest management strategies

SIMBA-NEM has been validated in two situations: a banana monoculture with intensive use of nematicides and high rainfall (field 3) and a crop sequence involving banana after sugarcane with low use of nematicides and heterogeneous rainfall (field 11). These two situations were characterised by the initial inoculum of each nematode species, nematicide use and soil humidity. The banana monoculture was characterised by the absence of

Table 3. Presentation of all data used for calibration and validation of SIMBA-NEM. A dataset was constructed with the results from finished field experiments using nematicides (Temik, Aldicarben, Cadusaphos) or not (control) and with unpublished data derived from ongoing field experiments. For both species, the number of phytoparasitic nematodes was measured, the extraction was made with the centrifugation-floatation method (Coolen et d'Herde, 1972).

Field number	Species present	Dates of measurements	Number of data	Pesticides	Uses
1	Rs	15/05/77-05/03/78	28	no	Calibration
2	Rs	17/07/77-05/03/78	25	no	Calibration
3	Rs	07/12/88-28/08/89	11	yes	Validation
4	Rs	28/06/88-08/07/91	22	yes	Calibration
5	Rs	28/06/88-08/07/91	22	yes	Calibration
6	Rs	28/06/88-08/07/91	22	yes	Calibration
7	Pc	03/12/02-09/01/04	11	no	Calibration
8	Pc	03/12/02-09/01/04	11	no	Calibration
9	Pc	06/06/03-09/01/04	6	no	Calibration
10	Rs	20/08/03-28/11/03	8	no	Calibration
11	Rs and Pc	17/08/01-30/10/03	48	yes	Validation

Table 4. Presentation of model parameter values, standard deviations and the number of fields used for the calibration.

Parameter	Used fields	Mean value	Standard deviation
c_{rs}	1 ; 2 ; 4	0.957	0.186
c_{pc}	7 ; 8 ; 9	0.713	0.202
K_{nem}^{max} (nb.g-1)	1 ; 2 ; 4 ; 7 ; 8 ; 9	521	59
a_{pest} (g.he-1)	4 ; 5 ; 6	1000	707
b_{pest}	4 ; 5 ; 6	0.1	0.0
a_{wat} (%)	10	0.4	-
b_{wat}	10	0.9	-
c_{wat}	10	1.0	-

The parameters are described in Table 1.

Pratylenchus coffeae and a high initial inoculum of *Radopholus similis*. The banana-after-sugarcane rotation was characterised by a high initial inoculum of *Pratylenchus coffeae* and a very small inoculum of *Radopholus similis*. **Fig. 3.** shows the simulated and measured populations of phytoparasitic nematodes per gramme of fresh root biomass (nb.g^{-1}) and the dynamic of banana fresh root biomass (g.ha^{-1}) for these two situations. The mean square error (MSE) and the root mean square error (RMSE) were calculated for each species in each simulation. The RMSE value provides information on the accuracy of the model for predicting the nematode inoculum at each measurement point in the same units as the model output (nb.g^{-1}). RMSE values obtained for Rs in “banana monocultures”, Rs and Pc in “banana-after-sugarcane” cropping systems were 76 (Rs), 63(Rs) and 118(Pc), respectively. These simulations showed that the model is able to predict the nematode population level with acceptable precision. This accuracy is sufficient for nematode population management. Hence, the model could be used as a decision aid for pesticide treatment programmes.

4.3. Sensitivity analysis and limits of the model

SIMBA-NEM has eight parameters and three input variables that have been estimated by measurements or by parameters fitting. The influence of parameters and inputs on outputs need to be estimated in order to determine the extent of their accuracies. A sensitivity analysis involves estimating the influence of parameters or inputs on state variables or on model outputs. In the case of SIMBA-NEM, the dynamics represent an important aspect of outputs. The sensitivity analysis has to take this aspect into account, since a simple output value is not sufficient to assess the accuracy of the model. We propose a sensitivity analysis of dynamics whereby output values are presented at every time step of the model for each tested parameter value. For each tested parameter or input, three or four values included in its variation range are tested, while other parameters are set at the calibrated values. The analysis is performed under typical climatic conditions during a period of 50 to 70 weeks that is compatible with the tested phenomenon.

Fig. 4. shows the results of the sensitivity analysis for variations in c_{rs} Pot; K_{nem} Pot; a_{pest} ; and b_{pest} . These results showed that the model accurately accounted for the parameter variations. The dynamics were dependent on these parameter values and highlighted the importance of the calibration. Population parameters (K_{nem} tot and c_{rs}) have a substantial impact on nematode dynamics, while pesticide response parameters have a lesser impact and are more

Fig. 3. Time-course variations in simulated and measured concentrations of phytoparasitic nematodes (nb.g⁻¹) and the root biomass (g.m⁻²) simulated by the SIMBA model for two pest management strategies, monocultures with pesticides (A) and banana after sugarcane with low pesticide inputs (B).

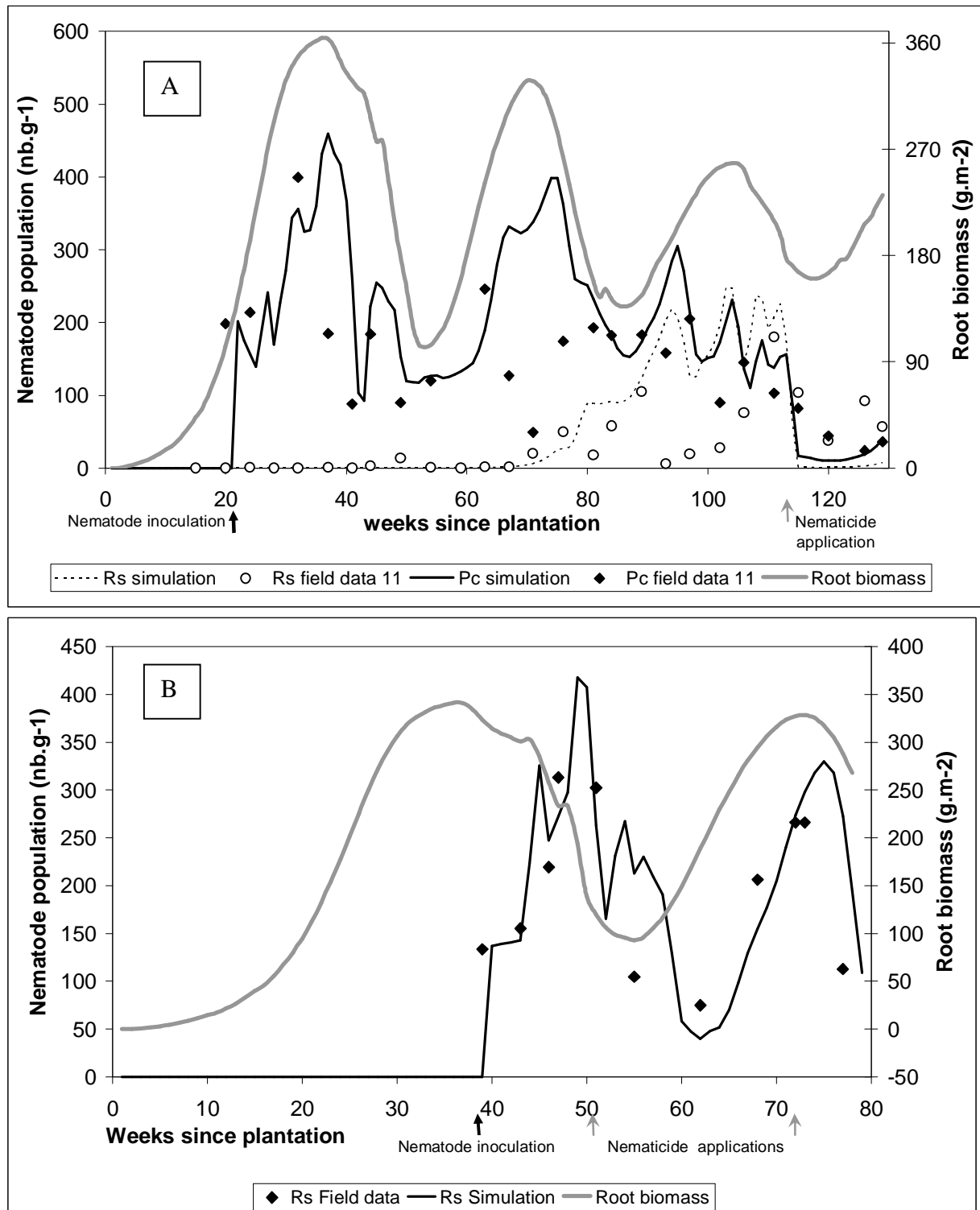
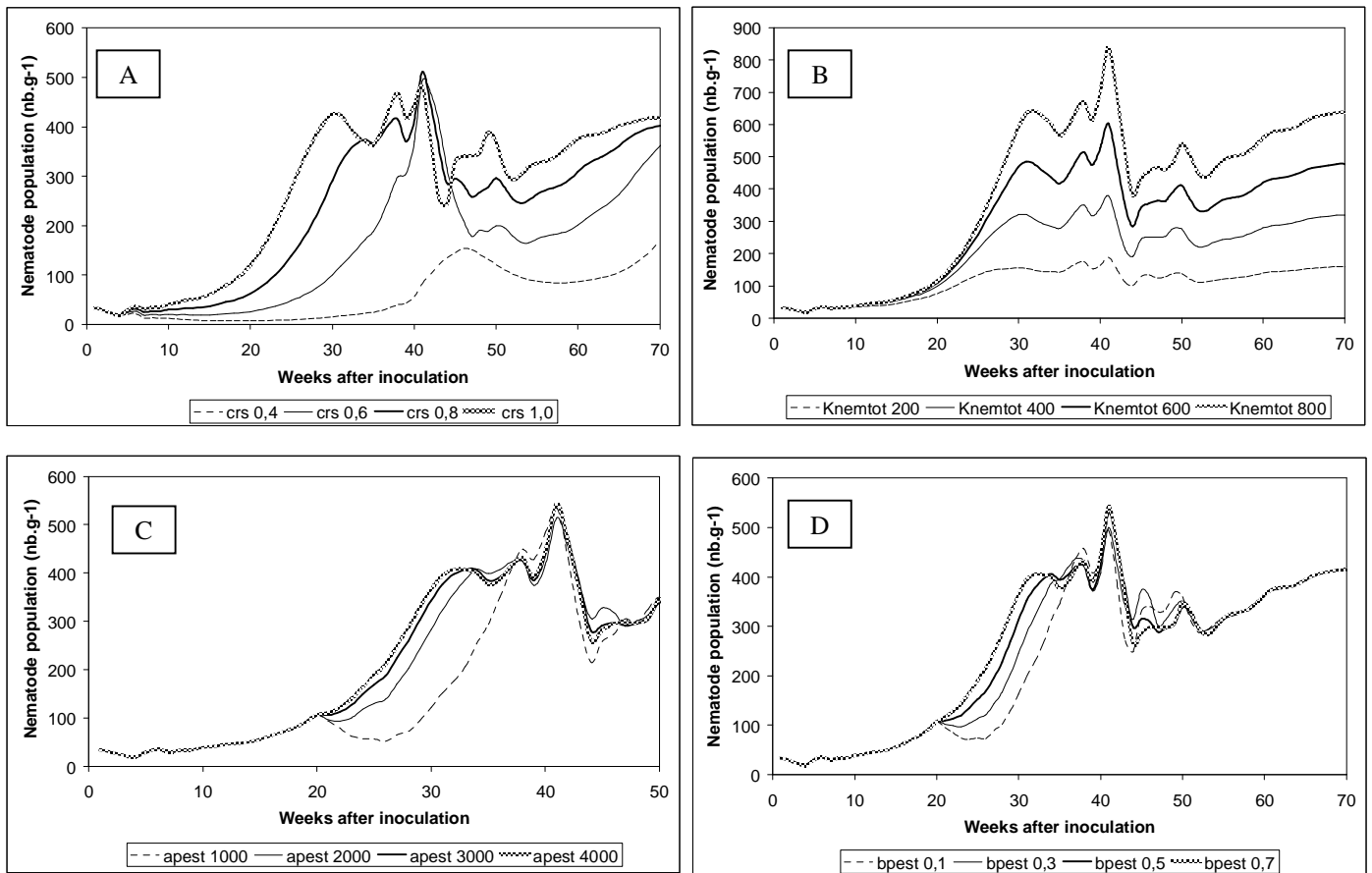


Fig. 4. Simulated concentration of phytoparasitic nematodes (nb.g^{-1}) in monospecies simulations for different c_{rs} (A), $K_{\text{nem,tot}}$ (B), a_{pest} (C) and b_{pest} (D) values. In each analysis, nontested parameters are set at their calibrated values.



dependent on the model inputs (Pest(t) and Wat(t)). The variations in the model output variables relative to parameter variations showed a logical trend, thus confirming the coherence of the model structure and the available knowledge about these phenomenon.

4.4. The multispecies competition in long-term simulations

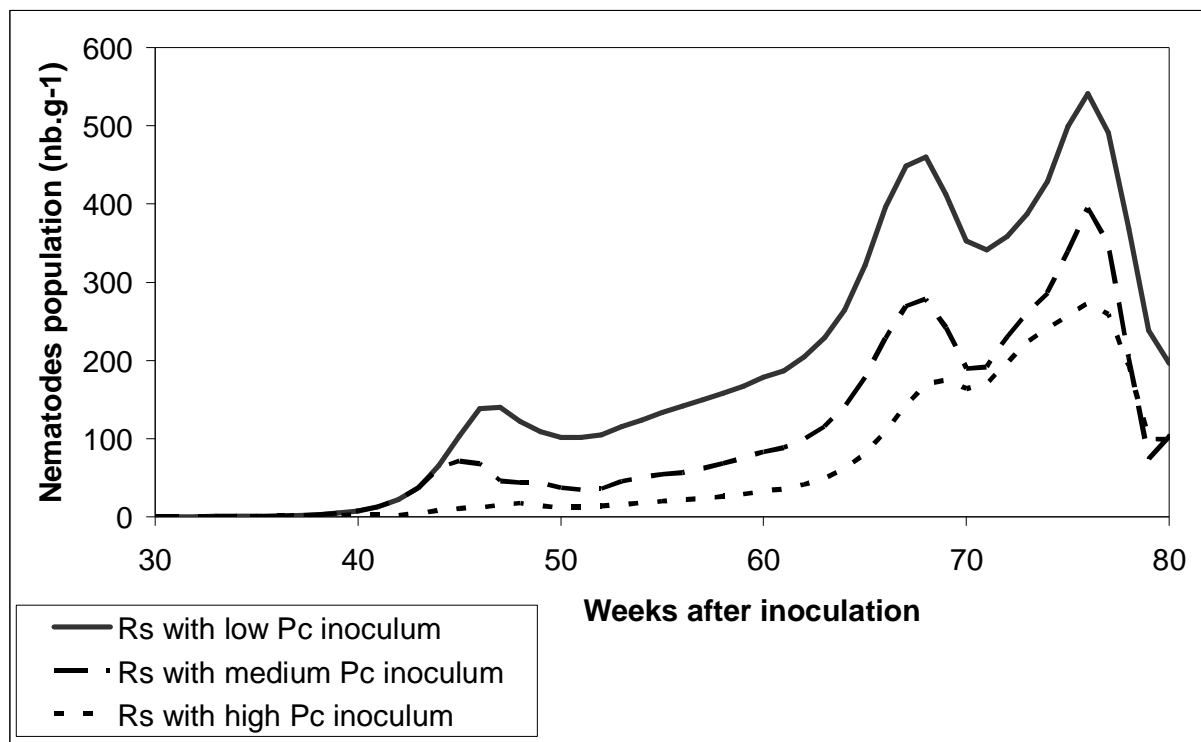
SIMBA-NEM was used to test different management strategies for phytoparasitic nematodes in the long term and the influence of the respective initial nematode inoculum for both simulated species. **Fig. 5.** shows three simulations of Rs. concentration with the same Rs. initial inoculum but with three different Pc. initial inocula. These simulations confirmed that the model accurately accounts for interspecific competition for the root resource and its importance to explain the nematode population dynamics. This capacity of the model is very important in actual banana cropping systems where *Radopholus similis* population are controlled with crops rotations such as sugarcane, pineapple or other plants that are not host or bad host or *Radopholus similis*. SIMBA-NEM can simulate cropping systems with various initial situations. After many cropping cycles, the simulations indicated (as in Fig.3.) the coexistence of both simulated species, without any complete exclusion of one species. This is in line with our observations obtained on a long-standing banana field, where the root parasite complex included many nematode species. When climax is reached, the ratio between the two simulated species is proportional to the population growth rate. The correlation between c_{rs} and c_{pc} parameters is due to the fact they represent in part their affinity for the host.

4.5. Optimisation of pest management strategies with SIMBA-NEM

We used SIMBA-NEM to optimise long-term nematicide applications in order to maximise their effects under precise planting date and pedoclimatic conditions. We tested, over a 3-year simulation period (planting the first of January and under a mid-elevation climate), a 'reasoned' nematicide application rules where the *Radopholus similis* population in banana roots was used as a control variable. The pesticide was applied every 12 weeks (minimum interval between two applications) when this population was above a threshold. We tested threshold values between 0 and 800 (nematodes/g of fresh root biomass). The output values are the mean *Radopholus similis* populations over the simulation period and the number of nematicide applications. **Table 5** shows, for every application number, the threshold that gave

the lowest Rs population. SIMBA-NEM is a powerful tool to tailor nematicide applications to nematode populations. SIMBA-NEM helps to choose the best nematicide program according to environmental (to reduce nematicide applications) or agronomic (to minimise *Radopholus similis* populations) objectives.

Fig. 5. Simulation of *Radopholus similis* concentration (nb.g⁻¹) with the same Rs. initial inoculum (0,01 Rs.gr⁻¹) but for 3 different *Pratylenchus coffeae* initial inoculum (low: 0,00001 Pc.gr⁻¹ ; medium: 1 Pc.gr⁻¹; high: 100 Pc.gr⁻¹), both species are inoculated in week 7.

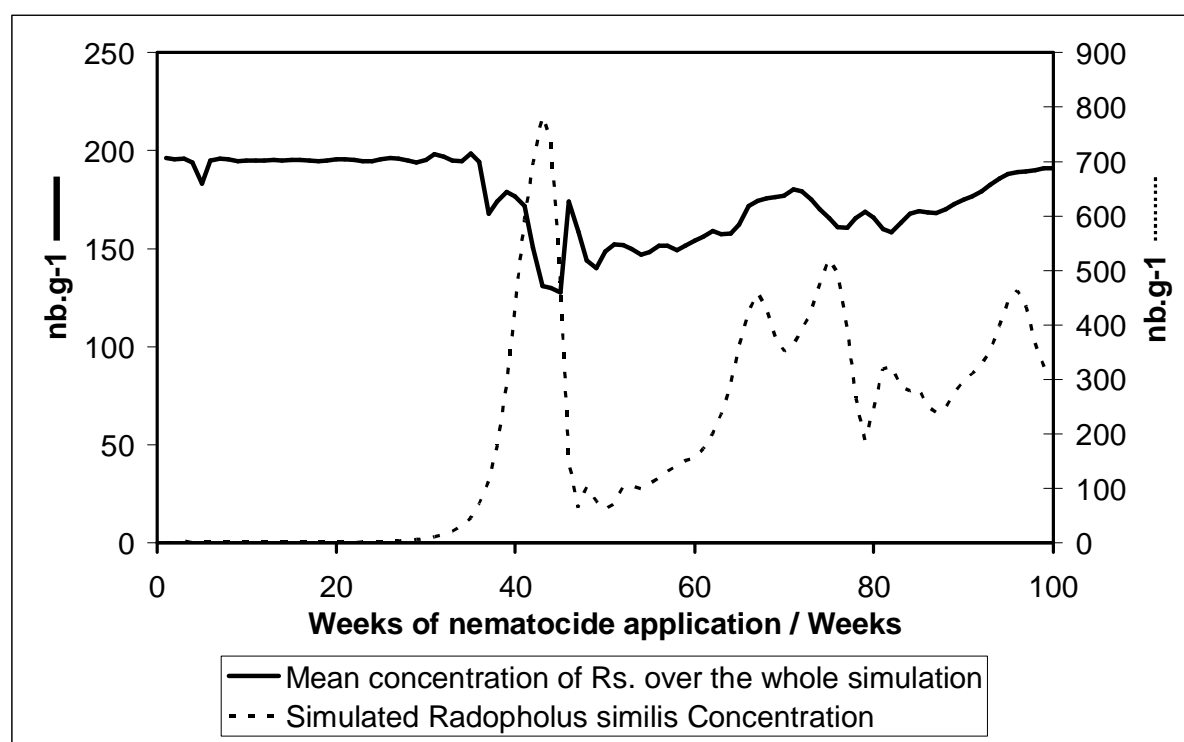


We also used SIMBA-NEM to optimise the date of nematicide application in a 100-week simulation. **Fig. 6.** shows the mean Rs population for each week of pesticide application (from 1 to 100) and the weekly Rs concentration without nematicide application. In these conditions, week 45 was found to be the best time to apply nematicides. This best period fits well with the time when the nematode populations increase very fast, at the end of the preflowering period when root growth is maximal.

Table 5. Optimisation, over a 3-year simulation, of the nematode population threshold to start nematicide application. Presentation, for each total number of nematicide applications, of the optimal nematode threshold and associated mean *Radopholus similis* root concentration (number of nematodes/g of fresh root biomass).

N°. nematicide applications	Rs. Nematode concentration threshold ($n^{\circ}.g^{-1}$)	Mean weekly Rs Concentration ($n^{\circ}.g^{-1}$)
1	480	224
2	460	220
3	-	-
4	440	209
5	-	-
6	360	175
7	240	158
8	150	144
9	140	140

Fig. 6. Mean concentration of *Radopholus similis* over the whole simulation for all the possible 'week of nematicide application (1 to 100) simulations (left axis) and the weekly *Radopholus similis* concentration for a simulation without nematicide (right axis).



5. Conclusion

SIMBA-NEM may be a very helpful tool for designing sustainable and more environment friendly banana cropping systems. When used in a global cropping system modelling and environmental evaluation environment (SIMBA), it provides essential information on plant parasitic nematodes dynamics what is needed for banana cropping system sustainability. In addition to classical innovations such as cover crops, genetic improvement, etc., the model approach can jointly assess time-course patterns concerning cultural practices and the natural dynamics of the agrosystem in order to optimise yield, preserve soil fertility and minimise environmental risks. Pest dynamic models are barely included in cropping system models or crop models due to their complexity. Nevertheless, they are essential to prototype more sustainable cropping systems. SIMBA-NEM will be used in the future to determine the best tradeoff between nematicide use and environmental risk when linked to SIMBA and environmental assessment indicators. It could also be used to test biological hypothesis regarding competition between species, the role of root growth in nematode development or other factors.

Acknowledgements

We are particularly grateful to the farmers of Guadeloupe who helped us to build the nematode database. We would also like to thank our colleagues from Martinique who helped us to define the modeling hypothesis, especially Dr Patrick Quénéhervé (Institut de Recherche pour le Développement).

References

- Bergé, J.B. Cuany, A. and Bride, J.-M. 1980. Mode d'action des nématicides. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 29 : 149-160.
- Beugnon, M. and Champion, J., 1966. Etude sur les racines du bananier. *Fruit*, 21, 309-327.
- Bonan, H., and Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n°2001-070, 77p.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonielli, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., and Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their

- water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18: 311-346.
- Cadet, P., and Debouzie, D., 1990. Evolution spatio-temporelle d'un peuplement de nématodes parasites de la canne à sucre. *Revue Nématol.* 13 (1) : 79-88.
- Cavelier, A. 1987. Le mode d'action des nématicides non-fumigants. *Agronomie*. 7 (10), 747-762.
- Champion, J., and Sioussaran, D. 1970. L'enracinement du bananier dans les conditions de la station de Neufchâteau (Guadeloupe). *Fruit.* 25, 847-859.
- Colbach, N., and Huet, P., 1995. Modelling the frequency and severity of root and foot diseases in winter wheat monocultures. *Eur. J. Agron.* 4(2), 217-227.
- Coolen, W.A., and d'Herde, C.J., 1972. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. Ghent state Agriculture Research Centre.
- Delvaux, B., and Guyot, P., 1989. Caractérisation, de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. *Fruits.* 44(12) : 633-647.
- Duncan, L. W. and H. Ferris. 1982. Interactions between phytophagous nematodes. Pp. 29-51 in D. W. Freckman, ed. *Nematodes in Soil Ecosystems*. University of Texas Press, Austin.
- Ehwaeti, M.,E., Elliott, M.,J., McNicol, J.,M., Phillips, M.,S., and Trudgill, D.,L., 2000. Modelling nematode population growth and damage. *Crop protection.* 19. 739-745.
- Fargette, M., and Quénéhervé, P., 1988. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 1. The nematofauna occurring in the banana producing areas. *Revue Nématol.* 11 (2) : 239-244.
- Fogain, R., and Gowen, S., 1995. Pathogenicity on maize and banana among isolates of *Radopholus similis* from four producing countries of Africa and Asia. *Fruits.* 50 (1) : 5-9.
- Fogain, R., Achard, R., Kwa, M., Ferrier, P., and Sarah, J.L., 1996. La lutte contre les nématodes des bananiers au Cameroun : bilan de 10 ans d'étude de l'efficacité de composés nématicides. *Fruits.* 51 : 151-161.
- Fogain, R., 2000. Effect of *Radopholus similis* on plant growth and yield of plantain (*Musa*, AAB). *Nematology*, 2 (2) : 129-133.
- Ganry, J., 1978. Essai BA-GU-NEU 102. Etude de la dynamique de population des nématodes (*Radopholus similis*) en fonction des conditions climatiques et du stade de développement du bananier. Rapport d'activité CIRAD. 12p.
- Gowen, S., and Quénéhervé, P., 1990. Nématode parasites of bananas, plantains and acaba. In : M. Luc, A. Sikora and J. Bridge (Editors), *Plant parasitic nematodes in subtropical agriculture*. CAB International, pp.431-460.
- Hannon, B. and Matthias, R., 1999. Multistage insect model. In: B. Hannon and M. Ruth (Editors), *Modelling dynamic biological systems*, Springer Verlag, New York, pp. 170-180.
- Hugon, R., Ganry, J., and Berthe, G., 1984. Dynamique de population du nématode *Radopholus similis* en fonction du stade de développement du bananier et le climat. *Fruits.* 39 (4) : 251-253.
- Hugon, R., and Picard, H., 1988. Relation spatiales entre taches et nécroses racinaires et nématodes endoparasites chez le bananier. *Fruits.* 33 (9) : 491-498.
- Kropff, MJ, PS Teng and R Rabbinge.1995. The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems.* 49, 413-434.

- Lassoudière, A., 1979. Comportement du bananier Poyo au second cycle. III- Etude d'une population. Fruits, 35 (1): 3-17.
- Lavigne, C., 1987. Contribution à l'étude du système racinaire du bananier. Mise au point de rhizotrons et premiers résultats. Fruits. 42 (5) : 265-271.
- Lecompte, F., 2002. Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effet des contraintes physiques liées au compactage. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 113p.
- Loridat, Ph., 1989. Etude de la microflore fongique et des nématodes associés aux nécroses de l'appareil souterrain du bananier en Martinique. Mise en évidence du pouvoir pathogène du genre *Cylindrocladium*. Fruits. 44 : 587-597.
- Oli, M., K., 2003. Partial life-cycle models: how good are they? Ecol. Model. 169, 313-325.
- Mateille, T., Foncelle, B., Ferrer, H., 1988. Lutte contre les nématodes du bananier par submersion du sol. Revue Nématol. 11 (2) : 235-238.
- Mateille, T., Cadet, P., and Quénéhervé, P., 1984. Influence du recépage du bananier Poyo sur le développement des populations de *Radopholus similis* et d'*Helicotylenchus multicinctus*. Revue Nématol. 7 (4) : 355-361.
- Quénéhervé, P., 1988. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 2. Influence of soil texture, pH and organic matter in nematode populations. Revue Nématol. 11 (2) : 245-251.
- Quénéhervé, P., 1989^a. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 3. Seasonal dynamics of populations in mineral soil. Revue Nématol. 12 (2) : 149-160.
- Quénéhervé, P., 1989^b. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 4. Seasonal dynamics of populations in organic soil. Revue Nématol. 12 (2) : 161-170.
- Quénéhervé, P., 1989^c. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 5. Screening of nematicides and horticultural results. Revue Nématol. 14 (2) : 231-249.
- Quénéhervé, H., 1990. Spatial arrangement of nematodes around the banana plant in the Ivory Coast: related comments on the interaction among concomitant phytophagous nematodes. Acta Œcologica, 11 (6), 875-886.
- Quénéhervé, H., 1991. Banana phenology in relation to phytophagous nematodes. In Biological and integrated control of highland banana and plantain pest diseases. Processings of a research coordination meeting. C.S. Gold and B. Gemmill editors. Cotonou, Benin, 12-14 November 1991. 218-230.
- Quénéhervé, H., 1993. Nematode management in intensive banana agrosystems : comments and outlook from the Côte d'Ivoire experience. Crop protection. 13 : 164-172.
- Risède, J.,M., and Simoneau, P., 2004. Pathogenic and genetic diversity of soilborne isolates of *Cylindrocladium* from banana cropping systems. Europ. J. of Plant pathology. 110 : 139-154.
- Sarah, J.L., 1986. Répartition spatiale des infestations racinaires de *Radopholus similis* (COBB) en relation avec la croissance et le développement du bananier Poyo en Côte d'Ivoire. Fruit. 41 (7-8) : 427-435.
- Sarah, J.L., 1993. Variabilité du pouvoir pathogène de *Radopholus similis* entre populations provenant de différentes zones de production du monde.. Info Musa. 2 (2) : 6.
- Savary, S., 1994.. Système, modèle, simulation : applications des concepts de l'analyse des systèmes en protection des cultures. Séminaire modélisation en protection des cultures. Montpellier 1994.141-156
- Seinhorst, J.,W., 1981. Water consumption of plants attacked by nematodes and mechanisms of growth reduction. Nematologica 27. 34-51.

- Shoener, T., W., 1983. Field experiment on interspecific competition. *The american naturalist*. 122(2) : 240-285.
- Simon, S., 1991. Essai BA-GU-NEU 155 rapport final. Comparaison des nouveaux nématicides disponibles en Guadeloupe : Aldicarbe, Cadusaphos et Oxamyl. Rapport d'activité CIRAD. 12p.
- Stöckle, C., O., Donatelli, M., and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy* 18. 289-307
- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M. 2004. SIMBA-POP : a cohort population model for long term simulation of banana crop harvest. *Ecol. Model. In press*.
- Turner, D.W., 1994. Banana and plantain. *In Environmental physiology of fruit crop*. Vol. 2, 37-64, CRC Press. pp. 206-229.
- Umesh, K.,C., Ferris, H., and Bayer, D., E., 1994. Competition between the plant-parasitic nematodes *Pratylenchus neglectus* and *Meloïdogyne clitwoodi*. *Journal of nemathology*. 26(3) 286-295.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff M.J., Bastiaans L., and Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Europ. J. Agronomy*. 18. 201- 234.
- Vilardebo, A., 1984. Problèmes scientifiques posés par *Radopholus similis* et *Cosmopolites sordicus* en cultures bananières des zones francophones de production. *Fruits*. 39 (4) : 227-233.

4.5. Le module économique SIMBA-ECO

SIMBA dispose d'un module du calcul de la marge brute de la parcelle simulée. Ce module a été développé à partir de données économiques recueillies dans le cadre du modèle MICA (Manceron, 2004).

Ce module simple est basé sur le calcul d'une marge brute en soustrayant les coûts de productions aux revenus liés à la vente des bananes. Il ne prend pas en compte les charges au niveau de l'exploitation, à l'exception des frais d'emballage et d'expédition des fruits. A chaque pas de temps le modèle calcule l'ensemble des coûts liés aux pratiques, répartis en coûts de main d'œuvre et en coûts d'intrants. Le **tableau II-16** présente l'ensemble des coûts unitaires des intrants et des temps de main d'œuvre pour chaque pratique ainsi que le coût de la main d'œuvre.

Les revenus sont calculés à chaque pas de temps en prenant en compte la variation saisonnière du prix de vente de la banane. Ce prix a été estimé en moyennant les prix des 10 dernières années. La **figure II-27** présente cette variation saisonnière du prix de vente.

La **figure II-28** présente un exemple de simulation des coûts cumulés, des revenus cumulés et de la marge brute pour un système de culture intensif bien maîtrisé et sans chutes.

Tableau II-16. Coûts unitaires des intrants et temps de travail associés à chaque pratique.

Pratiques	Temps de travail (jours)	Coût des intrants (euros)
Fertilisation par pied	0.01	0.01
Soins au régime par pied	0.15	0.01
Epandage herbicide par hectare	4	400
Epandage pesticide par hectare	0.01	900
Haubannage par pied	0.015	0.01
Oeilletonnage par pied	0.02	0
Plantation par 1800 pieds	30	1000
Conditionnement par kg récolté	0.01	0.1
Recourage par pied	0.01	0.5
Mécanisation par passage	4	2000

Avec coût de la main d'œuvre entre 66 et 38 euros par jour (déclarée ou non).

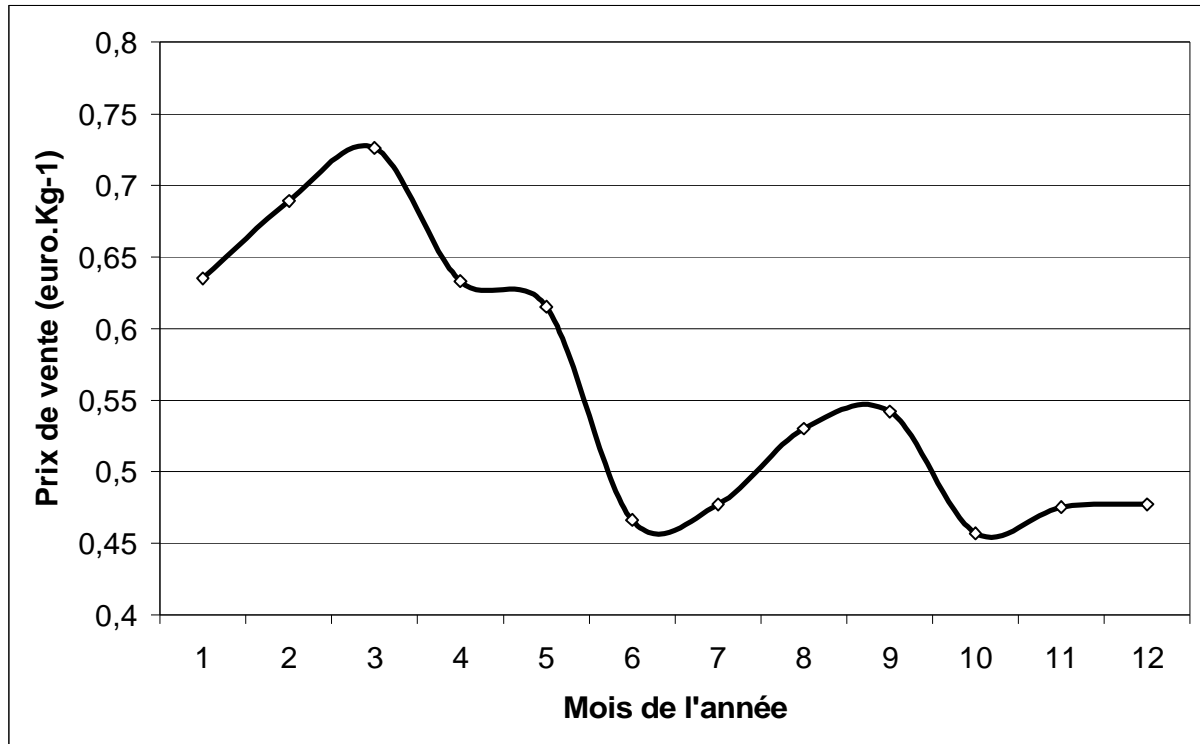


Figure II-27. Variation saisonnière du prix de vente de la banane en euros par kilogramme en fonction du mois de l'année (d'après les prix de vente des années 1992 à 2002).

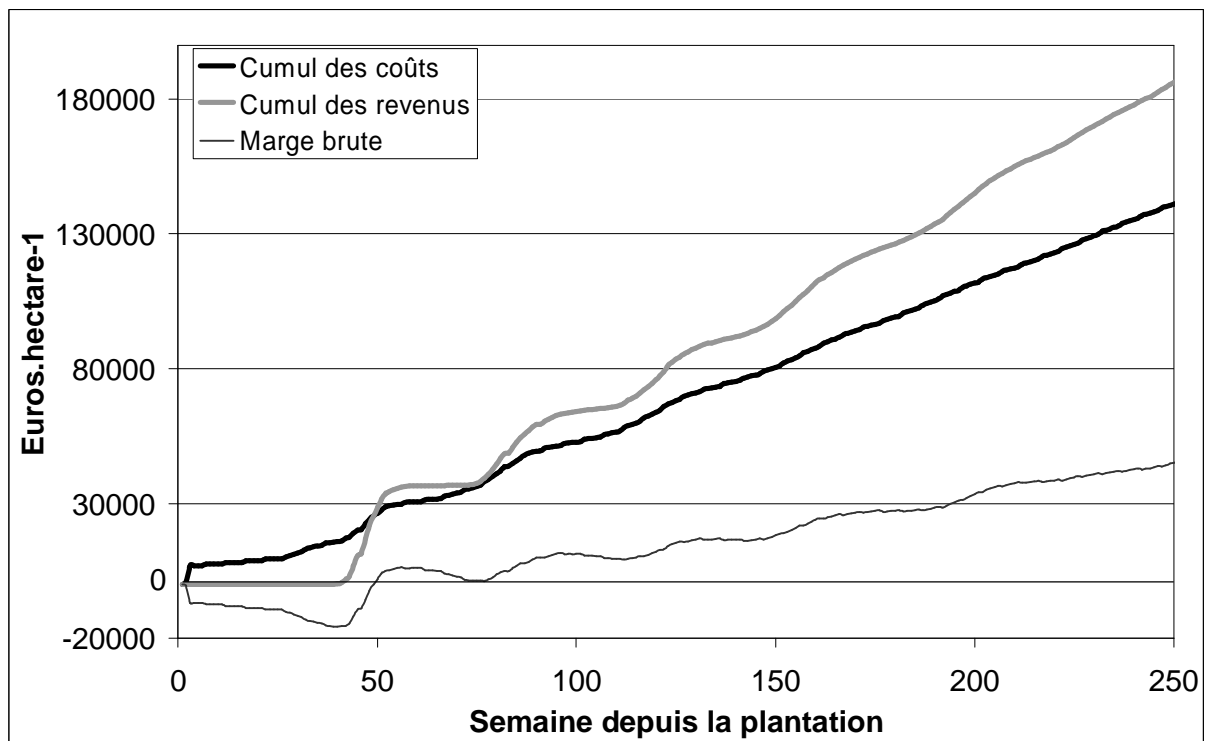


Figure II-28. Dynamique des coûts cumulés, des revenus cumulés et de la marge brute pour un système de culture semi intensif.

4. Conclusion du chapitre II

Ce chapitre présente la formalisation des connaissances sur le fonctionnement des agrosystèmes à base de bananiers sur andosols en Guadeloupe et leur mise en cohérence dans un modèle fonctionnel.

Les modules biophysiques quantitatifs ou semi-quantitatifs développés sont en interaction. Ils permettent de simuler sur le long terme les phénomènes biophysiques des systèmes de culture bananiers et fournissent les sorties nécessaires à leur évaluation. Le module de simulation du peuplement de bananiers est central. Il permet de prendre en compte la désynchronisation des bananiers au cours du temps en fonction des pratiques culturales et de l'écologie du peuplement de bananiers. Ce module est basé sur une structure en cohortes, l'accumulation de somme de températures et des lois stochastiques. Couplé au module de population, un module de croissance simule les caractéristiques du couvert végétal (LAI et biomasse des différents organes) et le rendement. D'autres modules simulent les caractéristiques du sol et le bilan hydrique de la parcelle simulée. La composante parasitaire tellurique est simulée par un module de dynamique des populations de nématodes phytoparasites du bananier. Ce module agit sur la croissance et la chute des bananiers.

Ces modules ont été calibrés et en partie validés à l'aide de données existantes ou acquises lors de ce travail.

Chapitre III La construction des indicateurs agro-écologiques
--

1. Objectifs des indicateurs

L'évaluation de la durabilité agronomique et environnementale des systèmes de culture constitue une composante fondamentale de la démarche de conception. Durant la dernière décennie, les méthodes d'évaluation des impacts tels ceux utilisés pour les études des milieux aquatiques (Neumann et al. 2003^{a,b}) ont connu un intérêt croissant. Bien que ces méthodes aient des objectifs souvent différents elles sont caractérisées par leur approche écologique des processus. Il est possible de définir un grand nombre d'impacts potentiels des agrosystèmes sur l'environnement comme le montre le **tableau III-1** (Giupponi 1998).

Tableau III-1. Présentation des principales atteintes des agrosystèmes à l'environnement d'après Giupponi 1998.

ATMOSPHERE	EAU	SOL
Fertilisants		
Emissions de NH ₃ et NO _x	Azote et phosphore vers les eaux de surface et de profondeur	Accumulation de phosphore et métaux lourds
Pesticides		
Emission directe lors de L'épandage.	Lixiviation des substances actives vers eaux de surface et de profondeur	Accumulation dans le sol
Volatilisation		Altération des cycles biologiques

Comment se construit un indicateur intégré ?

La première étape consiste à définir un jeu de variables (qui seront mesurées, estimées ou simulées), adaptée aux phénomènes devant être évalués. Dans un second temps des indicateurs intégrés peuvent être développés en agrégeant ces variables selon différentes

méthodes (Giupponi 1998, Bockstaller et al. 1997, Riley 2001). Les sorties des indicateurs doivent permettre d'évaluer l'intensité de phénomènes complexes, que chaque variable prise individuellement ne permet pas d'effectuer.

Il est possible de définir 2 grandes catégories d'indicateurs, certains étant uniquement basés sur les pratiques (indicateurs de moyens ou de risque), d'autres étant basés sur les effets estimés de ces pratiques (indicateurs d'effet ou d'impact) (Van der Werf et Petit, 2002). Ces différentes catégories d'indicateurs environnementaux sont utilisées aussi bien pour le pilotage des systèmes que pour leur labellisation ou encore comme outils d'analyse des politiques (Levitan 2000).

Dans la logique de conception de systèmes de culture assistée par modèle, les indicateurs d'évaluation des risques environnementaux doivent permettre :

- d'évaluer les phénomènes non modélisables,
- de systématiser la connaissance experte

L'approche double de modélisation et d'évaluation par indicateur que nous avons choisie ouvre par ailleurs des perspectives intéressantes Malkina-Pykh (2002), elle permet de :

- souligner l'interrelation qui peut exister entre indicateurs,
- prendre en compte le rendement,
- avoir une capacité prévisionnelle (utile dans une démarche de conception de systèmes durables),
- aider à l'identification des variables critiques,
- constituer un outil d'intégration des connaissances,
- avoir un aspect dynamique dans l'évaluation.

L'idée maîtresse de l'évaluation dynamique est que les modèles peuvent fournir des variables de description du système simulé à des pas de temps beaucoup plus fins que des mesures biophysiques au champ le permettraient. Ces variables peuvent servir à l'évaluation des risques environnementaux au même pas de temps.

Les principaux risques agri-environnementaux posés par les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe (voir Chapitre I) sont :

- la pollution des eaux par les produits phytosanitaires,

- l'érosion,
- la baisse de fertilité des sols.

Trois indicateurs ont été développés en vue d'évaluer ces risques, mobilisant différentes méthodologies permettant l'évaluation agri-environnementales (Girardin et al., 1999 ; Sánchez-Bayo et al., 2002 ; Smith et al., 1998 ; Riley, 2001 ; Reus et al. 2002 ; Van der Werf et al., 2002 ; Lefroy et al., 2003). Les indicateurs les plus simples sont fondés sur une seule variable alors que d'autres indicateurs plus complexes sont fondés sur l'agrégation de plusieurs variables, renseignées à partir de mesures de terrain (Vereijken 1997 ; Smith et al., 2000), de données disponibles sur l'exploitation agricole (Bockstaller et al., 1997) et/ou de sorties de modèles (Giupponi, 1998). Ces indicateurs permettent l'évaluation de phénomènes difficiles à modéliser, comme les risques de pollution par les produits phytosanitaires, ou plus intégrés, comme la fertilité. Leur construction doit tenir compte de la nature des milieux évalués ainsi que de leurs spécificités.

Pour développer ces indicateurs, c'est la méthodologie développée par l'INRA Colmar (équipe "Agriculture durable" UMR Nancy-Colmar) qui a été retenue (Indicateurs 'INDIGO'). La méthode INDIGO présente l'avantage de prendre en compte la connaissance des experts et permet l'agrégation de nombreuses variables. La méthode d'agrégation est basée sur un système expert et utilise la logique floue (méthode SELF présentée dans l'article qui suit). Ce type de méthode est de plus en plus utilisé, dans des domaines aussi variés que les indicateurs environnementaux (Enea et Salemi, 2001 ; Feraro, et al. 2003 ; Freissinet et al., 1998) ou l'amélioration de la couleur du vin (Guillaume et Charnomordic 2003).

2. Les indicateurs développés

2.1. Indicateur de risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires (article)

Depuis de nombreuses années le problème de l'exposition de l'environnement aux produits phytosanitaires est posé au centre de la problématique du développement de systèmes de culture plus durables (Wijnands, 1997). Un indicateur appelé Rpest a été construit qui permet l'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et de profondeur par les produits phytosanitaires. L'indicateur a été couplé avec le modèle SIMBA, ses sorties permettent

l'aide à la conception de système de culture. L'article qui suit présente l'ensemble de la méthodologie de construction de l'indicateur.

**Rpest - a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk
Application to banana-based cropping systems in FWI**

Tixier¹ P., Malezieux² E., Girardin³ P. Bockstaller⁴ C., Dorel¹ M.,

3- CIRAD-Flhor, UMR SYSTEM, 97130 Capesterre – Guadeloupe, French West Indies,
France

Tel.: + 33 (0)5 90 41 36 87

Fax: + 33 (0)5 90 86 80 77

E-mail address: tixier@cirad.fr

4- CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier Cedex 5, France.

Tel.: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

5- UMR INPL-ENSAIA-INRA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar,

BP 507, 68021 Colmar Cedex, France

Tel.: +33(0) 3 89 22 49 21

Fax: +33(0) 89 22 49 33

E-mail address: girardin@colmar.inra.fr

6- Association pour la relance Agronomique en Alsace (ARAA), c/o INRA, BP 507,
68021 Colmar Cedex, France

Tel.: +33(0) 3 89 22 49 80

Fax: +33(0) 89 22 49 33

E-mail address: bockstaller@colmar.inra.fr

Corresponding address

CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01,

34398 Montpellier cedex 5, France

Tel.: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

Abstract

Some features of banana-based cropping systems, like many intensive monocultures, may be detrimental to the environment. Pesticide use is a major source of surface water and groundwater pollution, and this risk is very high in the insular situation of the French West Indies (FWI). In order to assess these risks and help to design more sustainable cropping systems, we propose an indicator to assess pesticide pollution risk over time (Rpest). Rpest provides dynamic assessments through a linkage with a cropping system model that simulates environmental factors and agricultural practices. An expert validation check was conducted

and demonstrated that Rpest can rank cropping systems by risk as well as by experts. A sensitivity analysis highlighted that the indicator can take active ingredient properties and pedoclimatic data into account in assessments. Rpest helps to pinpoint high pollution risk periods, while enabling testing of alternatives and between-system comparisons. This tool can be integrated in a model-based global prototyping methodology of more sustainable cropping systems.

Keywords

Agro-environmental indicator; banana cropping system; pesticide water pollution; model-indicator linkage

1. Introduction

Intensive agrosystems are hampered by their low ecological, agronomic and socioeconomic sustainability in many regions worldwide. Soil erosion and the widespread use of chemical pesticides are the main factors upsetting the natural environmental balance. Hence, there is high local, national and international demand to develop more environment-friendly cropping systems to overcome these problems.

A tradeoff between socioeconomic, ecological and agrotechnical imperatives is required to develop agrosystems that are more sustainable (Vereijken 1997). Tools which evaluate different ecological risks are essential for designing these new sustainable cropping systems. Biophysical models are, however, still not sufficient for quantifying these risks. Some models are still under development for the specific conditions of the F.W.I., but they are not design for diagnostic or cropping system designing but to study active product transfert in some specific pedoclimatic and geological conditions. Different agro-environmental indicator based assessment methods have been developed as tools to enhance diagnosis, cropping system management and designing new practices (Girardin et al., 1999; Sánchez-Bayo et al., 2002; Smith et al., 1998; Riley et al., 2001; Reus et al. 2002; Van der Werf et al., 2002; Lefroy et al., 2003). These tools can be implemented by various stakeholders (farmers, scientists, agricultural and political coordinators) to assess cropping or production systems at a cropfield or a regional level. The simplest indicators are based on a single variable, whereas other more complex indicators aggregate several field-measured variables (Vereijken 1997; Smith et al., 2000), available data on farming systems (Bockstaller et al., 1997) and/or modelling output

(Giupponi, 1998). These indicators are useful for assessing phenomena that cannot be simulated, such as pesticide pollution risk, or integrated notions such as fertility. They must be designed to take the type of environment and its specific features into account in assessments. Some indicators are solely based on farmer production practices (means-based indicators) while others focus on the estimated impacts of those practices (effect-based indicators) (Van der Werf, 2002).

Tropical plantations that produce bananas for export to the world market are generally intensive monocropping systems managed with heavy pesticide treatment programmes. In Guadeloupe (FWI), the pesticide risk is quite high since such banana plantations are located close to inhabited areas and fragile natural environments (primary tropical forests, freshwater resources). Most of these plantations are on the volcanic island of Basse-Terre and the pesticide risk and environmental impact vary according to local pedoclimatic and topographical conditions (rainfall range 1000-7000 mm/year, 0-45° slope, andosol-based toposequences, etc.), and also according to the cropping system used. Strategies must now be developed to limit the major environmental impacts that have already been documented (Bonan and Prime 2001). These strategies could include crop management sequences involving rotations with other crops such as sugarcane and pineapple, fallowing, tailored tillage techniques and, especially, sustainable management of cropping cycles and pest control. However, tools are still required to assess these new systems.

Most agro-environmental indicators currently available are designed to improve annual assessments of cropping systems, often for only a single cropping cycle. However, at this time scale, it is not possible to determine short-term risks or monitor risk variations over time. These indicators are thus unsuitable for evaluating perennial and semi-perennial cropping systems such as banana cropping systems whose features vary over successive cycles (shift from a homogeneous banana stand in the first cropping cycle to an increasingly heterogeneous stand, with plants at different phenological stages, in subsequent cycles). It is nevertheless essential to be able to determine critical periods when environmental impacts could be high in order to enhance the development of sustainable cropping systems (Boiffin et al., 2001). Environmental impacts can change quickly and over a broad range with time, especially when banana cropping systems are involved. Indicators thus have to be developed to assess short-term risks while taking the unique features of banana-based cropping systems into account.

Our study was aimed at constructing a dynamic agro-environmental indicator to facilitate: i) assessment of risks caused by the entrainment of pesticides leaching or runoff in these specific systems, ii) temporal integration of these risks so as to determine long-term changes in these systems. It links risk indicators with SIMBA, a cropping system model that simulates different characteristics of banana stands (above- and below-ground biomass, LAI, yield, etc.) and the environment (water balance, physical characteristics of the soil, etc.) on a field level, and highlights the long-term patterns. The SIMBA model has been calibrated and validated with respect to conditions in Guadeloupe (Tixier et al. 2004) and it could eventually be implemented to assess other cropping systems.

2. Concept and construction of a dynamic indicator for assessing pesticide water pollution risk in banana plantations (Rpest)

Agro-environmental indicators usually consist of an aggregation of several variables and are used to simulate the impact of complex phenomena that are impossible to measure directly. Such indicators are built through the following steps (Girardin et al., 2000):

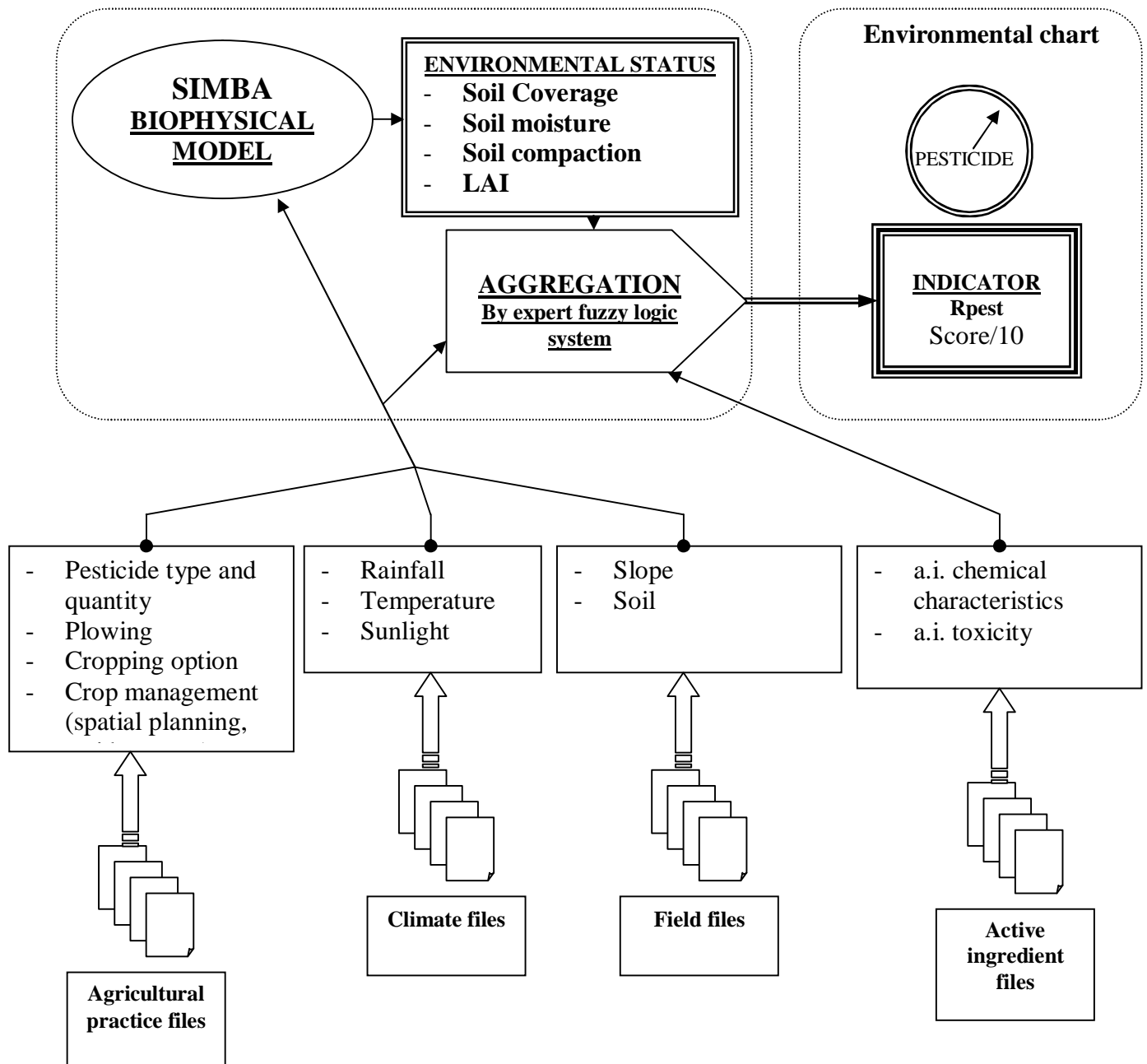
- Identification of objectives and users
- Aggregation of information
- Choice of thresholds
- Indicator sensitivity tests

We constructed our indicator Rpest following this 4 steps, taking into account the constraints of banana-based cropping systems and our specific dynamic and long-term objectives.

2.1. Objectives and users

We aimed to assess and compare risks of water pollution by pesticides generated by different banana-based cropping systems over time under the conditions that prevail in the West Indies. The assessment was conducted at the field level because farmers generally apply their tactical and strategic options at this level. Agronomists and people of extension services are the main users of such indicators, which they implement with the aim of developing less pollutive and more sustainable cropping systems. The dynamic Rpest indicator was designed to fulfil this need.

Surface water and groundwater are the environmental compartments that were considered. These media, which are crucial for human survival, are especially sensitive to pesticide pollution. Surface water and groundwater quality is affected by the influx of active ingredients transported by runoff, leaching and drift, respectively. Pedoclimatic conditions

Fig. 1. General structure of the dynamic Rpest indicator.

and cropping practices that modify these flows have a very substantial influence on the risk of environmental pollution by these products. Knowledge on different states of the environment during high-risk periods (heavy rain storms) is required to be able to accurately assess those risks.

2.2. Aggregation of information

Agro-environmental indicators used to assess cropping systems generally involve aggregation of variables concerning the cropping cycle under investigation, e.g. the Ipest indicator is based on an annual evaluation of the cropping systems (Van der Werf and Zimmer 1998). These tools cannot, however, detect and determine the origin of critical periods in the cropping cycle. We thus decided to develop a dynamic indicator that could take transient phenomena and their temporal patterns into account. Hence, only variables concerning instant noncumulative phenomena were considered.

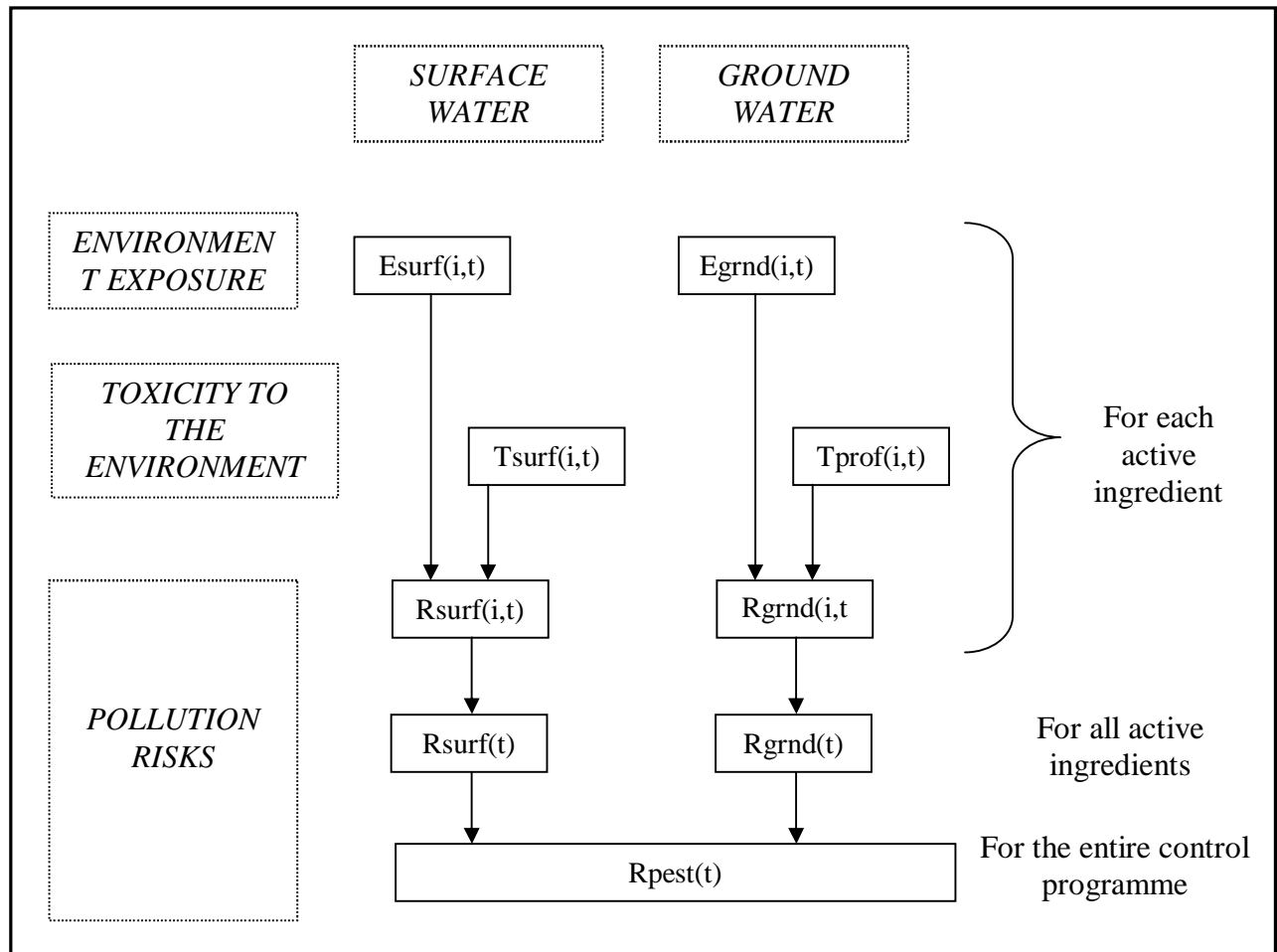
The general structure of the dynamic Rpest indicator is shown in Fig.1. It highlights the architecture of interactions between input data (that describe farming practices, climate, field characteristics and active ingredients used), the calculation processes and the final indicator. These input data are used directly to calculate the indicators, or used by the biophysical model to calculate intermediate environmental status variables, e.g. runoff and drained water quantities. Rpest generates simulations on a weekly time step, which is compatible with the SIMBA model outputs and with the frequency of on-farm measurements.

The Rpest construction process involved four steps:

- Assessment of the risk of exposure (surface and groundwater) for each active ingredient.
- Assessment of the toxicity of each active ingredient
- Integration of the exposure and toxicity to calculate a risk score for each active ingredient.
- Integration of risk scores for all active ingredients in a global score corresponding to the risk of a global pesticide treatment programme.

The first two steps (assessment of exposure and toxicity risks) were conducted for groundwater and surface water. A pollution risk subindicator was calculated for each compartment (Rsurf and Rgrnd). These two subindicators were then aggregated in the global

Fig. 2. Flowchart for the indicator for "i" active ingredients of a pest control programme at each time step "t" in the indicator calculation.



indicator (Rpest) of the overall risk of pesticide water pollution (Fig. 2.), the note of risk vary between 0 and 10 which mean respectively no risk and maximal risk . Table 1 presents the input data and variables for the modules or subindicators presented.

Table 1. List of variables used in the Esurf(i,t), Egrnd(i,t), Tsurf(i,t), Tprof(i,t), Rsurf(t), Rgrnd(t) and Rpest(t) indicators for each active ingredient.

Variable (unit)	Origin	Fuzzy class range	Fuzzy class curve
Data and variables associated with the risk of surface water exposure to the active ingredient "i" (Esurf)			
S(i,t) weekly quantity of potentially entrained active ingredient "i" (kg/ha)	Calculation	0 - 1	Sigmoid
RUI(t) volume of water transported from the field by runoff for week t ($\text{m}^3 \cdot \text{he}^{-1} \cdot \text{w}^{-1}$)	SIMBA model	0 - 30	Straight line
Data and variables associated with the risk of groundwater exposure to the active ingredient "i" (Egrnd)			
S(i,t) weekly quantity of potentially entrained active ingredient "i" (kg/ha)	Calculation	0 - 1	Sigmoid
Groundwater ubiquity score (GUS)	Active ingredient property	1.8 - 2.8	Sigmoid
DRA(t) volume of water transported from the field by drainage for week t ($\text{m}^3 \cdot \text{he}^{-1} \cdot \text{w}^{-1}$)	SIMBA model	0 - 100	Straight line
Data associated with the toxicity of the active ingredient "i" in surface water (Tsurf)			
Half-life DT50(i) (days)	Active ingredient property	1 - 30	Sigmoid
Aquatox(i) ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	Active ingredient property	0 - 1	Sigmoid
ADI(i) ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Active ingredient property	0 - 1	Sigmoid
Data associated with the toxicity of the active ingredient "i" in groundwater (Tprof)			
Half-life DT50(i) (days)	Active ingredient property	0 - 30	Sigmoid
ADI(i) ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Active ingredient property	0 - 1	Sigmoid
Variables associated with the risk of surface water pollution by the active ingredient "i" (Rsurf(i,t))			
Esurf(i,t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid
Tsurf(i,t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid
Variables associated with the risk of groundwater pollution by the active ingredient "i" (Rgrnd(i,t))			
Egrnd(i,t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid
Tprof(i,t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid
Variables associated with the overall risk of pesticide water pollution (Rpest(t))			
Rsurf(t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid
Rgrnd(t) (score/10)	Subindicator	0 - 10	Sigmoid

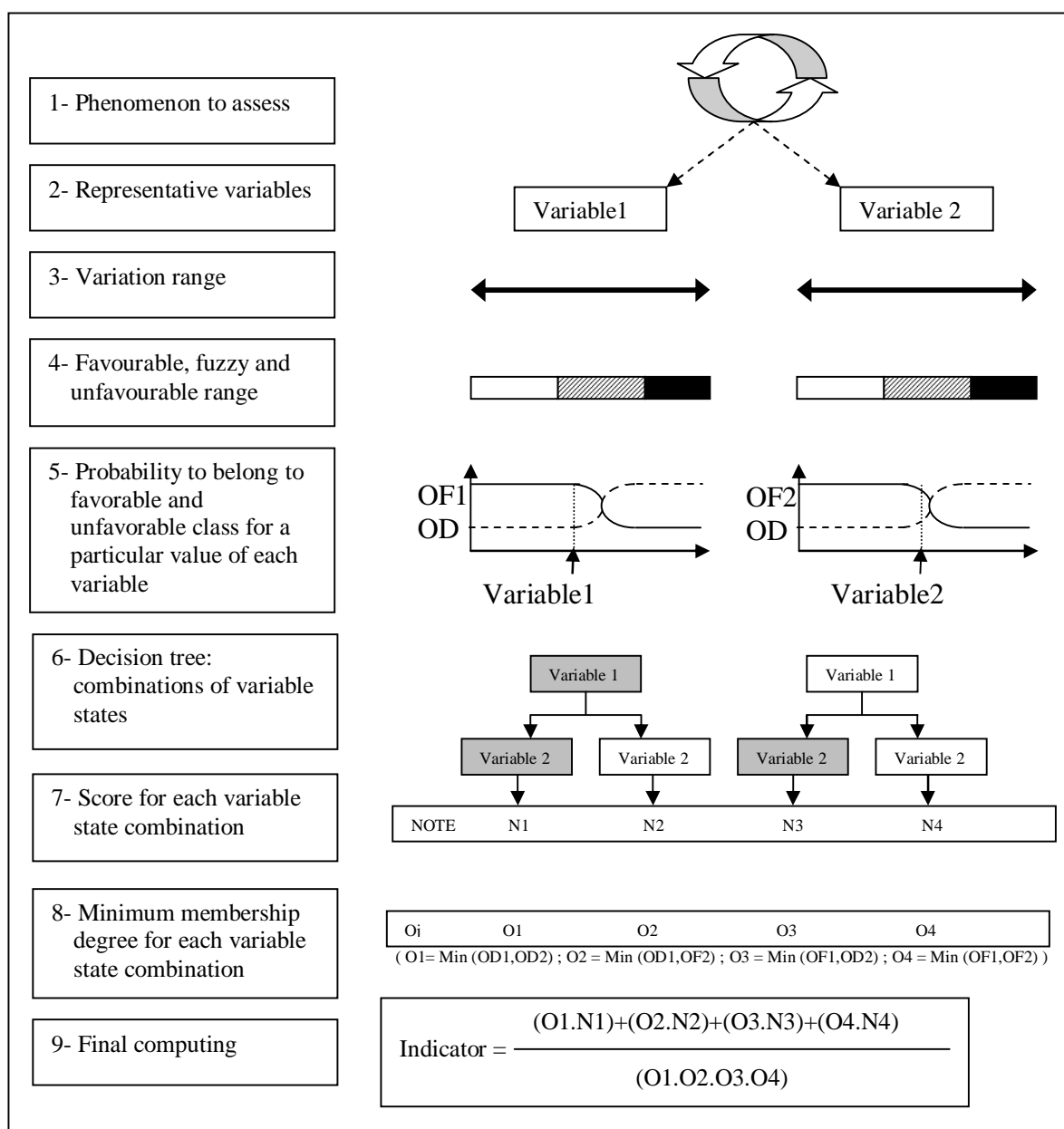
2.3. Procedure for aggregation of variables using an expert fuzzy logic system (EFLS)

The aggregation procedure is similar to methods used for agro-environmental indicators involving fuzzy logic (Fressinet et al. 1998; Phillis and Andantiatsaholiniana 2001). The concept behind this procedure has been described by Silvert (2000) and Cornelissen et al. (2001) and applied in a simplified way by Van der Werf and Zimmer (1998).

EFLS can be used to aggregate different types of variables using scientific expert knowledge. It is suitable for the assessment of complex situations that cannot be handled with conventional mathematical tools (means, sums, simple weighting, complex models). The aggregation process can be divided into four steps, as simplified in the diagram shown in Fig. 3.

- Definition of the phenomena. Explanatory variables for each phenomena must be determined (e.g. the runoff volume and potentially leachable quantity of an active ingredient so as to be able to calculate the risk of leaching of this ingredient into the ground water).
- Construction of a decision tree that gives a score for each combination of variables, while integrating scientific knowledge relative to the assessed phenomena supplied by experts. The state of each variable is taken into account, i.e. favourable or unfavourable. A score (N_i) determined by experts is assigned to each combination of variable it represents the intensity of the assessed phenomenon.
- For each variable 'j', within the range of values considered as favourable and unfavourable, two degrees of membership values OF_j and OD_j ranging from 0 to 1 are associated to the favourable and unfavourable class and follow a specific response curve (sigmoid, straight line, plateau, etc.).
- The final indicator is calculated from the values selected for each variable using the SELF method. The two values (OF_j and OD_j) are associated with each selected variable value. A degree of membership O_j is associated with each decision tree score N_j , corresponding to the minimum degrees of membership of the variables of the score combination considered, e.g. for N_j , variable O_1 is equal to: $O_1 = \text{minimum}(OF_1:OF_2)$. Equation 1 calculates the final score.

$$\text{Value of the indicator} = (\sum^i (N_j * O_j)) / (\sum^i O_j) \quad (1)$$

Fig. 3. Summary of the ESFL procedure to assess a phenomenon.

The final score of each indicator is calculated at each time step of the model.

2.4. Calculation of the Rpest indicator

2.4.1. Assessment of the risk of exposure to each active ingredient

Pesticide exposure risk assessments are based on estimated quantities of active ingredients that could be entrained by leaching or runoff. The active ingredient stock ($S(t)$) varies at each time step according to inputs ($APP(t)$) and the degradation potential $DEG(t)$ (Eq. 2).

$$S(t) = S(t-1) + APP(t) - DEG(t) \quad (2)$$

The degradation potential of an active ingredient at time step t ($DEG(t)$) is presented in Equation 3. It is based on the halflife of ingredient i ($DT50i$). Fig. 4. shows time-course variations in residual ($deg_{i,WSP(i,t)}$) and degraded ($DEG_{i,WSP(i,t)}$) quantities of an active ingredient i according to the number of weeks since the application of the active ingredient $WSP_{(i,t)}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{If } APP_{(i,t)} = 0 \\ \text{Then Last_APP}_{(i,t)} = \text{Last_APP}_{(i,t-1)} \\ \text{Or Else Last_APP}_{(i,t)} = APP_{(i,t)} \end{array} \right. \quad (3)$$

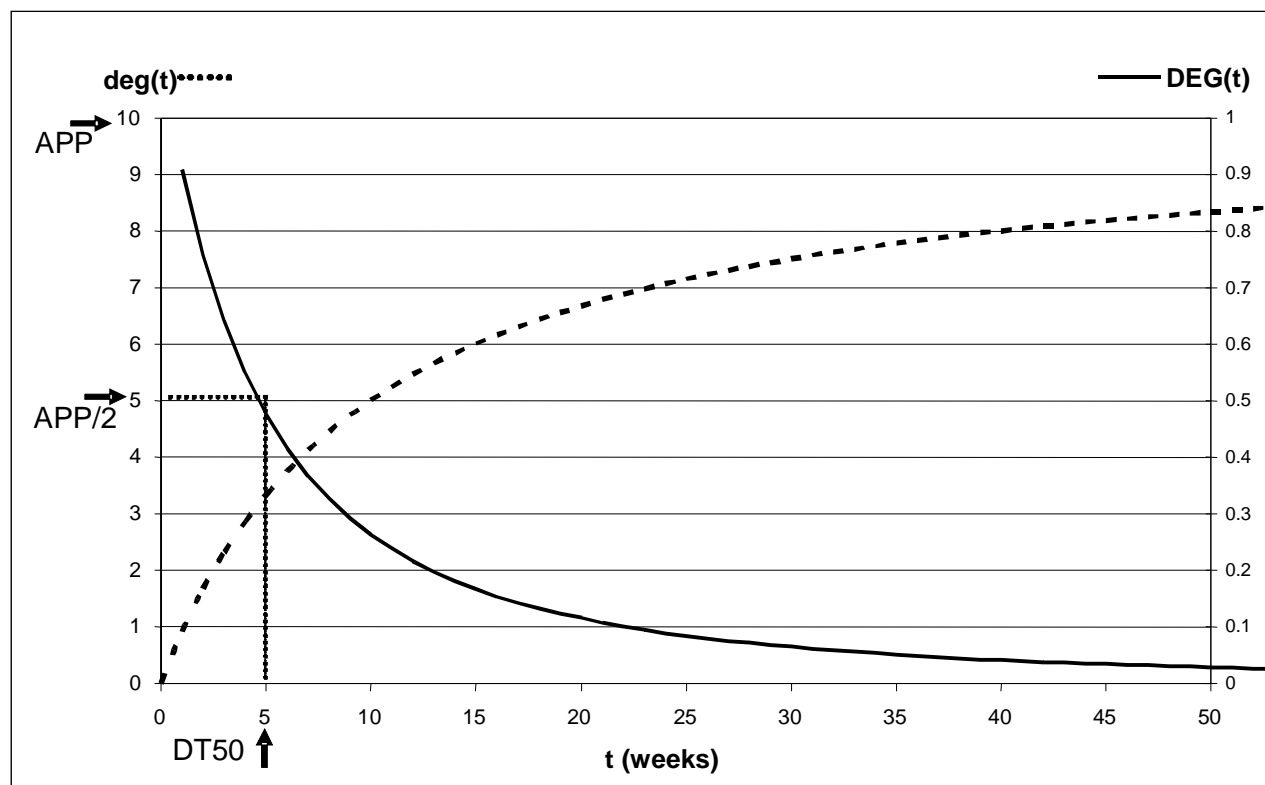
$$deg_{(i,WSP(i,t))} = (APP_{(i,t-1)} / ((DT50(i) / (WSP_{(i,t)})) + 1)) \quad (3')$$

$$DEG_{(i,t)} = deg_{(i,t)} - deg_{(i,t-1)} \quad (3'')$$

This type of time-course pattern for soil-borne active ingredient concentrations has been widely described under different pedoclimatic conditions (Zheng and Cooper 1996; Guibaud et al. 1999), and it is currently being confirmed in the andosols that prevail in Guadeloupe (Cattan, pers. comm.).

Estimating the potential active ingredient stock on the basis of the halflife is simple in comparison to more complex models that take pesticide fixation on soil organic matter into account. This type of model has not yet been developed for the soils and cropping systems assessed here. Degradation is likely underestimated by the halflife method considering the rapid degradation of different studied compounds (organophosphates and carbamates) in soils

Fig. 4. Curve plotted for the degradation potential ($\text{deg}(t)$) of an active ingredient ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) and curve of variations in the weekly quantity of degraded active ingredients ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{week}^{-1}$) for an active ingredient with a DT50 of 10 weeks and an initially applied quantity of APP = 1 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.



(Jamet and Piedallu, 1980; Simon-Sylvestre and Fournier, 1980; Zheng and Cooper, 1996; Matthiessen, 2001). The advantage of the proposed method is, however, that it can pinpoint potential risk periods, even though they will likely be overestimated. Moreover, a broad range of active ingredients can be compared.

The risk of surface water ($E_{surf}(i,t)$) and groundwater ($E_{grnd}(i,t)$) exposure to each active ingredient i is evaluated by integrating:

- The potentially movable stock $S(i,t)$ of each active ingredient i (for groundwater and surface water).
- The groundwater ubiquity score (GUS) of each active ingredient ($GUS(i)$) for groundwater (Gustafson, 1989 in Van der Werf and Zimmer 1998)
- The runoff $RUI(t)$ and drained $DRA(t)$ water volume at time step t (variables calculated by the SIMBA model (for groundwater and surface water)).

These variables are aggregated via EFLS for surface water (Fig. 5a) and groundwater (Fig. 5b). The fuzzy class ranges for $S(i,t)$, $GUS(i)$, $DRA(t)$ and $RUI(t)$ are given in Table 1.

$S(i,t)$ is considered to be highly unfavourable when the treatment dose is 1 kg/ha, which corresponds to the maximum quantity of active ingredient applied per hectare in banana cropping systems. $S(i,t)$ is considered to be favourable in the absence of treatment (0 kg/ha). A fuzzy class defined by a sigmoid response occurs in the interval between these two values.

GUS is considered to be favourable when it is below 1.8 and unfavourable when above 2.8 (Van der Werf and Zimmer 1998).

$RUI(t)$ and $DRA(t)$ are considered to be unfavourable at 30 and 100 m³/ha/week, respectively, which occurs when there are very heavy rain storms in the study area and under conditions that are conducive to runoff or drainage. They are considered to be favourable when there is no runoff or drainage (0 m³.h⁻¹.w⁻¹). A fuzzy class defined by a linear response occurs in the interval between these two values.

Fig. 5. Flowcharts for the different variable state combinations (grey = unfavourable; white = favourable) for the calculation of a) subindicators of risk of surface water and b) groundwater exposure to pesticides.

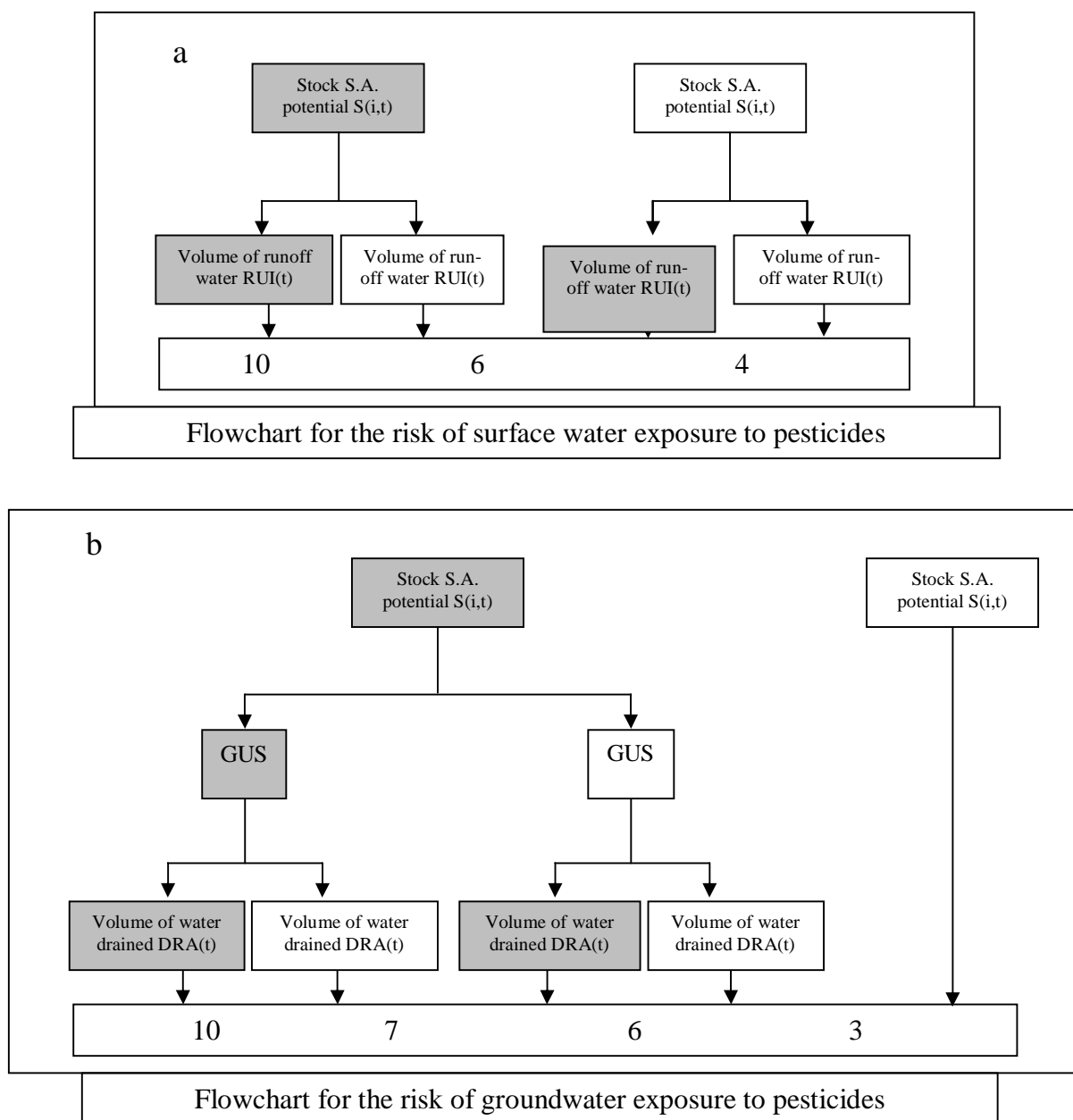
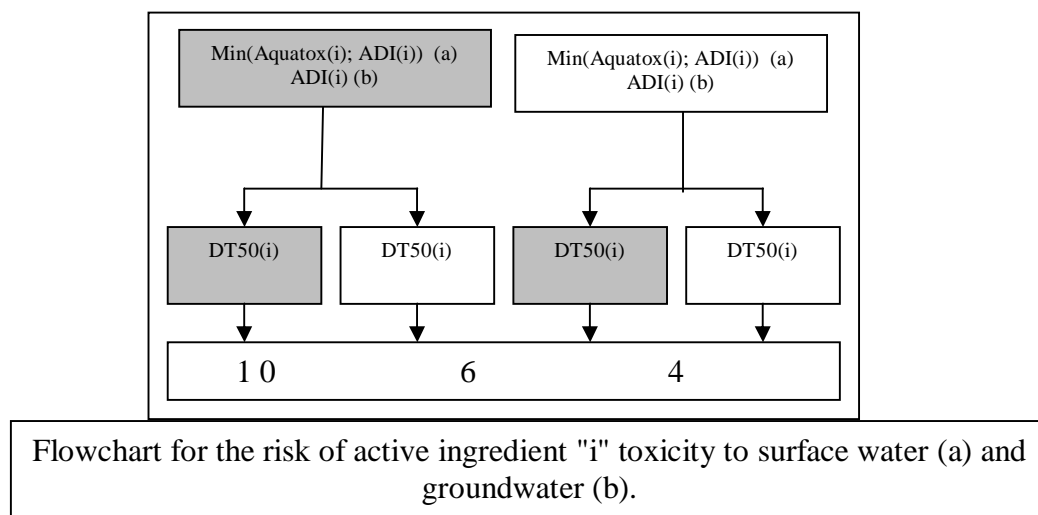


Fig. 6. Flowcharts for different state variable combinations (grey = unfavourable; white = favourable) for calculation of subindicators of the risk of a) surface water and b) groundwater toxicity to pesticides.



2.4.2. Assessment of the toxicity of each active ingredient

The toxicity of each active ingredient in surface water and groundwater is evaluated with the subindicators $T_{surf}(i,t)$ and $T_{prof}(i,t)$ which are dependent on the intrinsic properties of the active ingredients. These variables are aggregated by the EFLS method according to the decision rules presented in Fig. 6. The variables ADI and Aquatox represent, for an active ingredient, the acceptable daily intake for human health (in $mg.kg^{-1}$) and the toxicity to aquatic fauna and flora (in $mg.l^{-1}$), respectively. Only the toxicity to humans (ADI) is considered for groundwater. For surface water, the minimum ADI and Aquatox levels are taken into consideration because this water also serves as a drinking water supply.

2.4.3. Global score calculation per active ingredient

Exposure scores for each environment and the toxicity of each active ingredient in surface water ($R_{surf}(i,t)$) and groundwater ($R_{grnd}(i,t)$) are integrated by aggregating the toxicity exposure risk scores associated with each environment and for each active ingredient using the EFLS method according to the decision trees presented in Fig. 7A. and Fig. 7B.

The global score (for the set of "n" active ingredients) for the risk of pesticide pollution of surface water $R_{surf}(t)$ and groundwater $R_{grnd}(t)$ is the score calculated for the active ingredient that shows the highest risk (Equations 3 and 3').

$$R_{surf}(t) = \text{MAX}_{(i=1 ; i=n)} R_{surf}(i,t) \quad (3)$$

$$R_{grnd}(t) = \text{MAX}_{(i=1 ; i=n)} R_{grnd}(i,t) \quad (3')$$

$$R_{pest}(t) = \text{MAX} (R_{grnd}(t); R_{surf}(t)) \quad (3'')$$

A global pesticide pollution risk score (R_{pest}) is calculated on the basis of the maximum $R_{surf}(t)$ and $R_{grnd}(t)$ values. A mean R_{pest} score can then be calculated to obtain a general score for the entire cycle of the investigated cropping system.

3. Sensitivity test

A sensitivity analysis was carried out to test the performance of the indicators with variations in the input variables or parameters. The results of this analysis differed when fixed variables (slope, active ingredient properties, etc.) and dynamic variables (rainfall, soil coverage, etc.) were involved. For the dynamic variables, the same cropping system was assessed while the test variable vary (e.g. rainfall in lowland and highland areas). The indicator score patterns thus varied with the different variables. Indicator score patterns for a frequently replanted

banana monoculture system located at medium elevation were thus obtained for different applied active-ingredient toxicity (Aquatox and ADI), halflife and GUS values for Rgrnd (Fig. 8 a, b and c) and Rsurf (Fig. 9 a and b). The results of these analyses revealed that the

Fig. 7. Flowcharts for the different variable state combinations (grey = unfavourable; white = favourable) for the calculation of subindicators of risk pesticide pollution of a) surface water and b) groundwater. Rgrnd and Rsurf indicators are able to distinguish between cropping systems when active ingredients with different properties are applied.

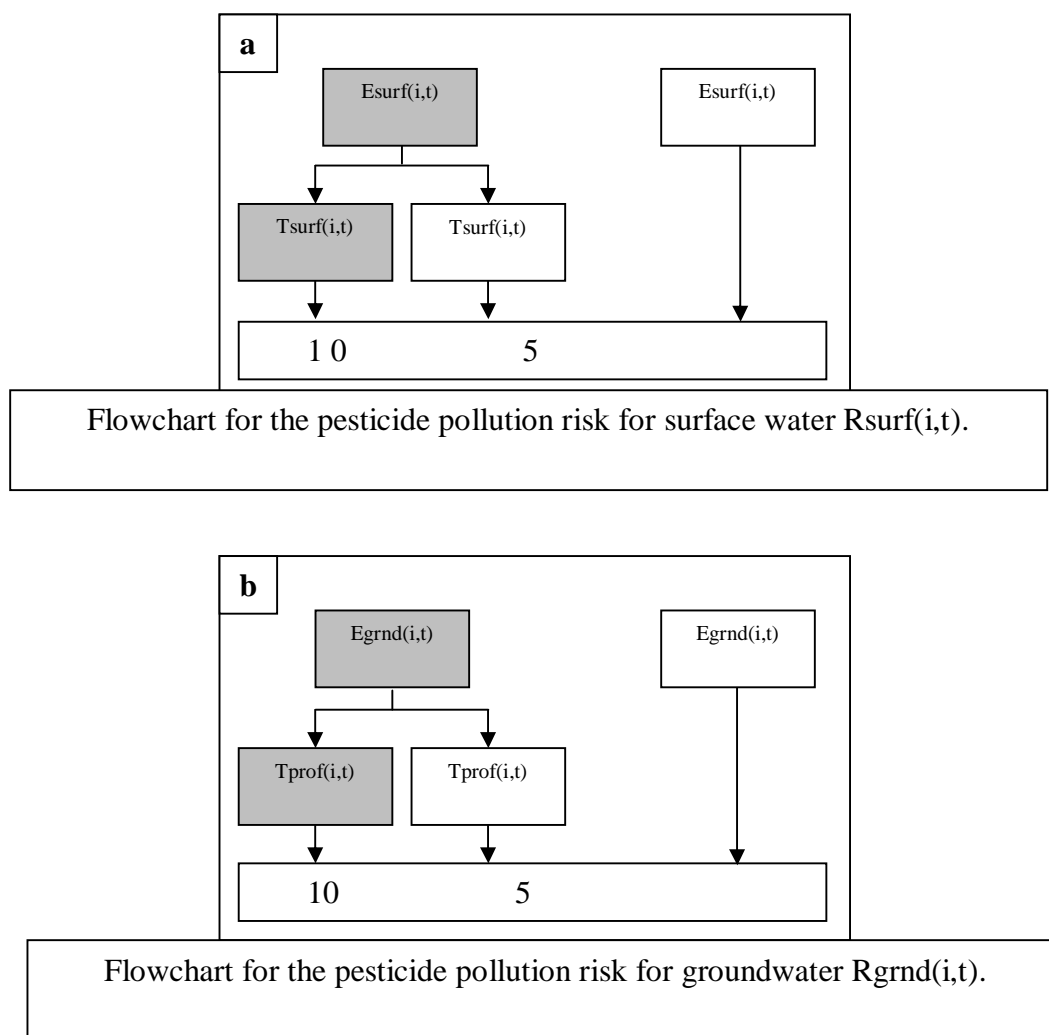


Fig. 8. Analysis of the sensitivity of the pesticide groundwater pollution risk indicator (Rgrnd)—under initial monoculture conditions with a pesticide treatment 5 weeks after planting—to variations in: a) the halflife DT50; (with ADI set at 0.5 and GUS set at 2); b) ADI (with Aquatox set at 0, DT50 set at 15 and GUS set at 2); and c) GUS (with ADI set at 0.5 and DT50 set at 15).

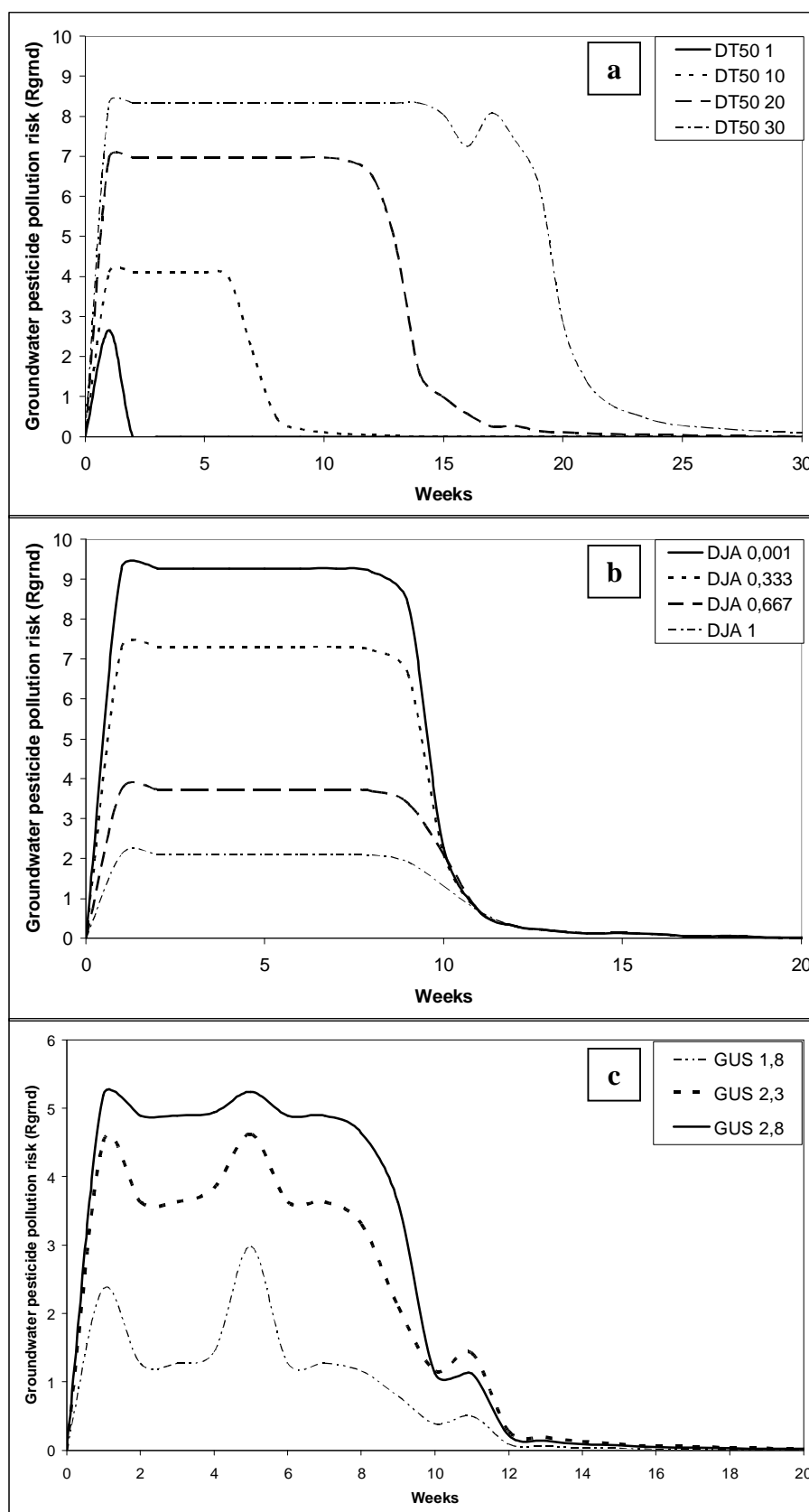


Fig. 9. Analysis of the sensitivity of pesticide surface water pollution risk indicators (Rsurf)—under initial monoculture conditions with a pesticide treatment 5 weeks after planting—to variations in: a) the halflife DT50; (with ADI set at 0.5); and b) toxicity (ADI, with Aquatox set at 0 and the DT50 set at 15).

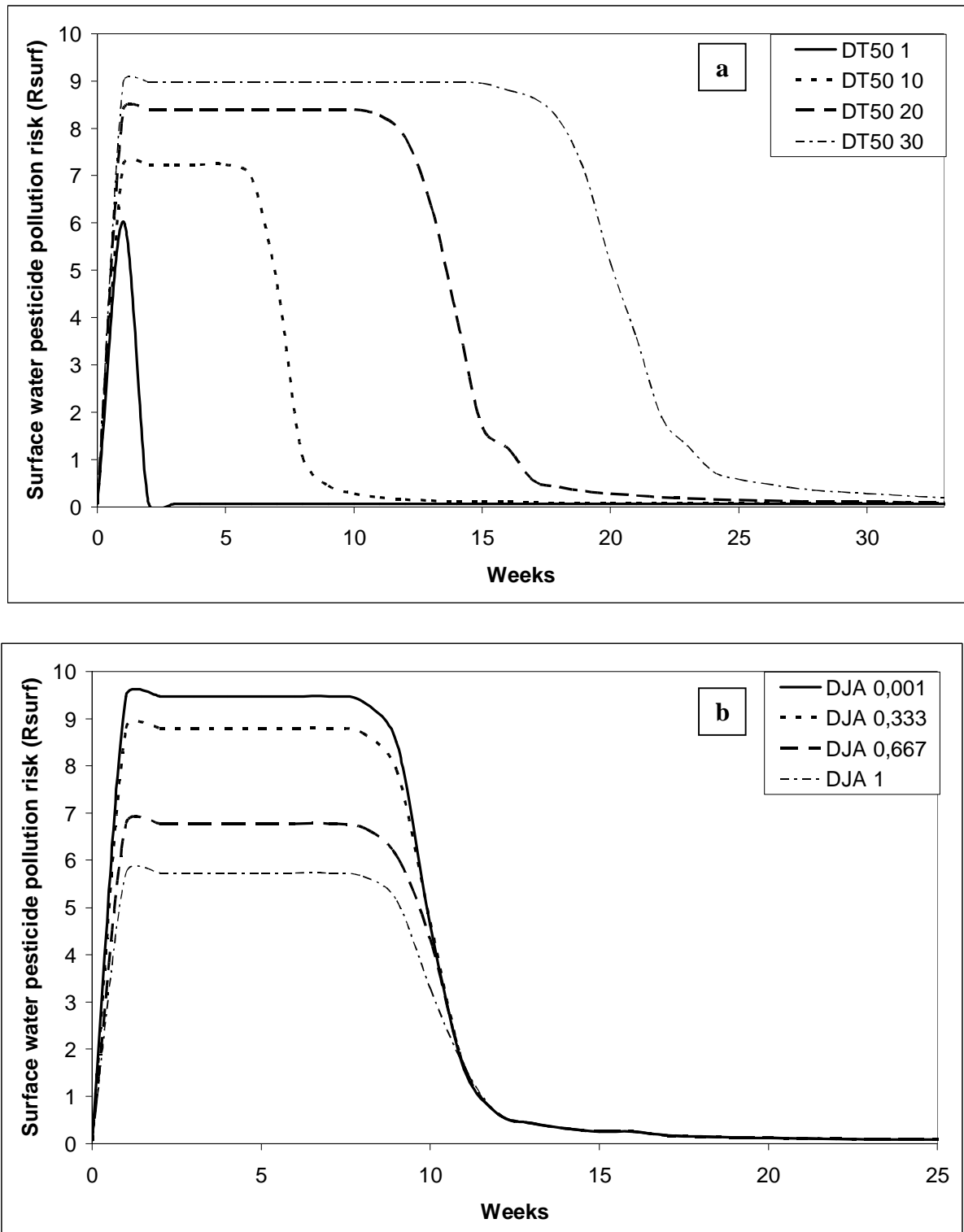


Fig. 10. shows variations in the Rpest indicator for the same frequently replanted banana monoculture system under three different climatic conditions with low, medium and high rainfall levels. Rpest accurately accounted for the rainfall dynamics and intensity. The test variable (rainfall) was one of the variables whose dynamics induced temporal variations in the final indicator score, which is key factor with respect to pesticide runoff and leaching. This sensitivity analysis revealed that Rpest can efficiently assess pesticide pollution risk for cropping systems under different pedoclimatic conditions—information that could be useful for tailoring cropping systems to local pedoclimatic conditions.

4. Indicator validation

Indicators that can be used for assessing complex processes that often reflect notions that do not always have quantitative equivalents (Bockstaller and Girardin 2003). They can be implemented to compare different states of one system or different systems. Dynamic indicators must be able to highlight temporal variations in real impacts and to accurately rank cropping systems according to intrinsic pollution risks. We decided to get experts to validate Rpest. They checked how accurately the indicators were able to rank cropping systems according to pollution risk.

For the five cropping systems assessed, Fig. 11 presents the mean Rpest scores and mean ranks and variation ranges for the four experts. Rpest could be validated by comparing the ranks obtained with the indicator and those allocated by the experts. A Spearman rank correlation coefficient was calculated between expert and Rpest ranks for each cropping system, i.e. 20 pairs (4 experts and 5 cropping systems). The Spearman rank correlation coefficient obtained was: $r_s = 0.9865$ ($n=20$; degrees of freedom = 18; $t=25.52$), so the Rpest ranking was not rejected at the 0.001 threshold. The cropping system rankings obtained with Rpest were always within the same variation range as the expert rankings. The final expert rankings obtained on the basis of the mean expert ranks was the same as that obtained with Rpest.

Fig. 10. Analysis of the sensitivity of global pesticide pollution risk indicators (Rpest)—under initial monoculture conditions with a pesticide treatment 5 weeks after planting—to rainfall variations (low, medium and high rainfall).

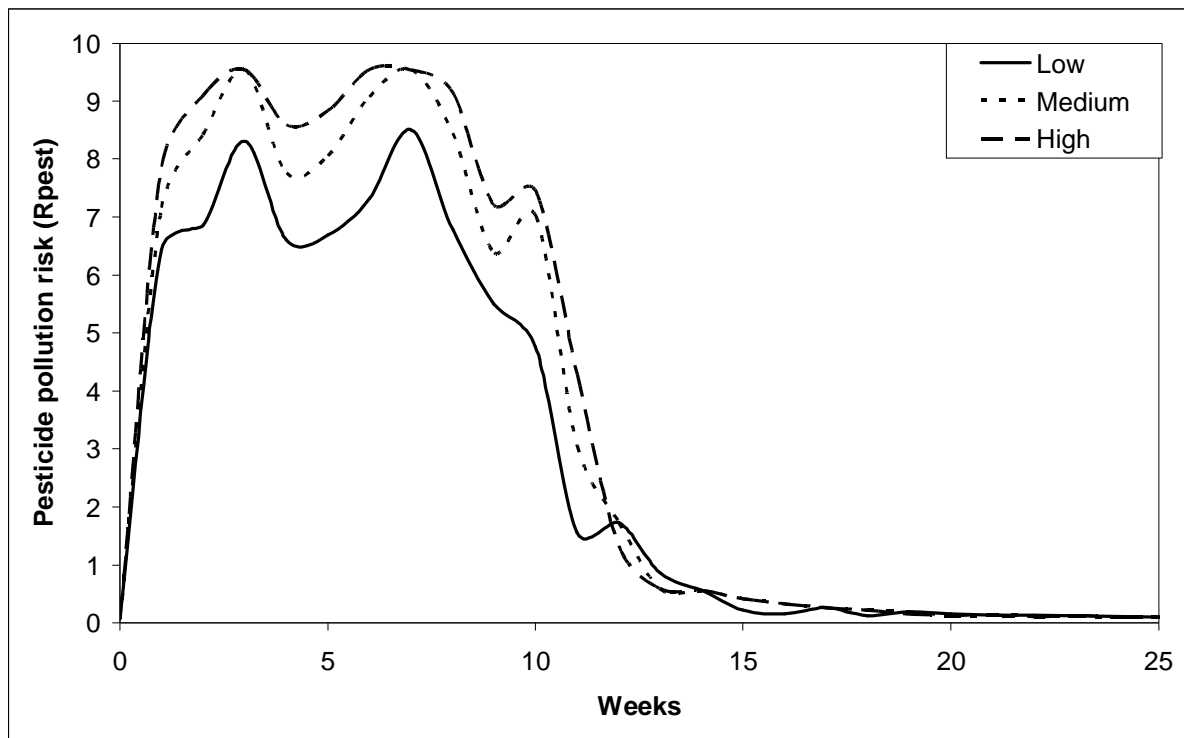
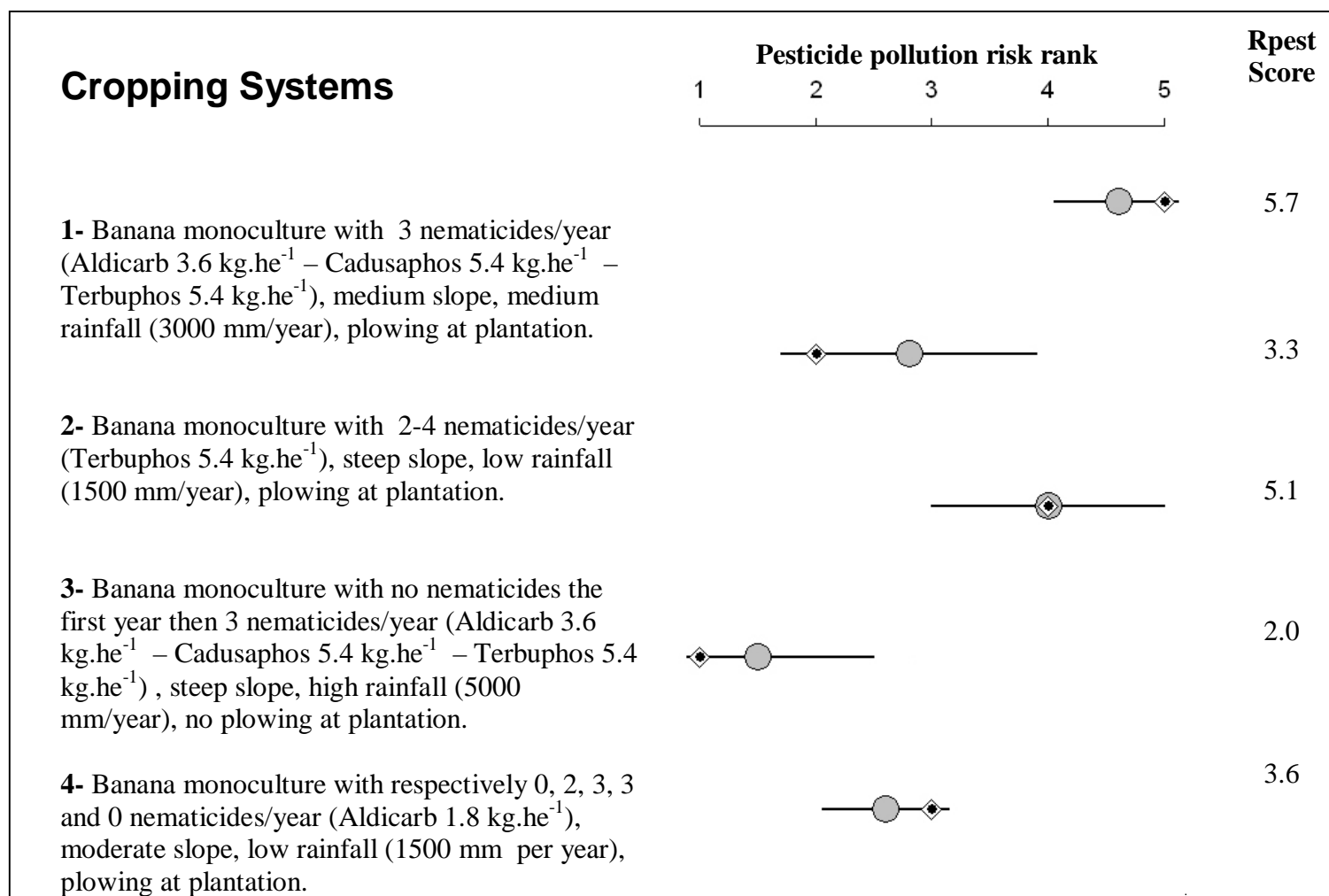


Fig. 11. Pesticide pollution risk rank for five cropping systems assessed by Rpest (◇) and by four experts (● final expert ranks and — mean expert rank and variation range).



5. A comparative assessment of two cropping systems using the Rpest indicator

An environmental assessment of two different cropping systems was performed using the Rpest indicator in the same pedoclimatic environment (medium elevation, slope and rainfall). The first system was a frequently replanted (every 2-3 years) intensive banana monoculture system with high chemical pesticide input. The second was a rotational system with banana planted after a fallow period using a pest management strategy, whereby pesticides were only applied when nematode populations reached a level that could be detrimental to the crop. The pesticides used were nematocides (alternate application of Cadusaphos and Terbuphos at 5.4 kg a.i./treatment).

Fig. 12 shows time-course variations in the Rpest indicator for these two systems after the banana crop was planted. This indicator highlights the risk periods. In the managed system, a period without treatment had a substantial influence on the mean indicator score (3.6 and 1.2 for the intensive and managed systems, respectively) over the 150-week assessment period.

A risk profile was then drawn up for each system (Fig. 13). These profiles corresponded to the Rpest indicator score distribution (over the entire assessment period) in three score classes (0-3.3; 3.3-6.6; 6.6-10). This integration of dynamic data in a score distribution efficiently incorporates the dynamics without information loss, contrary the mean scores. Such risk profiles are useful for comparing different cropping systems and can be considered as an environmental signature of specific cropping systems under given pedoclimatic conditions. This presentation takes the persistence of the applied pesticides into account and the importance of high-risk periods. The risks can be transient or long-term, depending on the environment and type of active ingredient involved, so the environmental impacts can differ.

6. Discussion and Conclusion

Dynamic indicators are efficient for evaluating time-course variations in the impacts of cropping systems on surface and ground water. To help in designing and developing more environment-friendly cropping systems, indicators are a real improvement compare to the tools available. They could assist stakeholders in making tactical decisions through comparisons of potential outcomes (e.g. weed control using herbicides or mechanical weeding machines). Different types of variables can be integrated with those indicators since they are

based both on a modeling of biophysical cropping system and on an "expert system" approach.

Fig. 12. Rpest patterns for two cropping systems. Rpest means are 3.6 and 1.2 for the intensive and managed system, respectively.

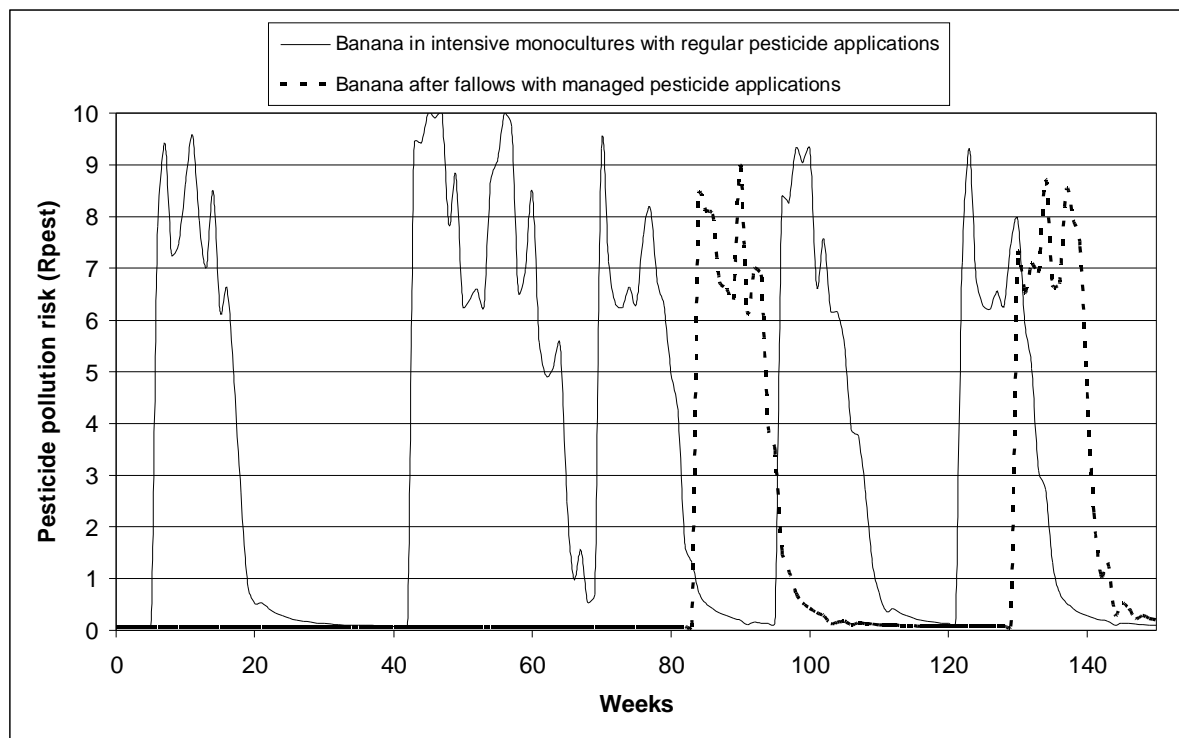
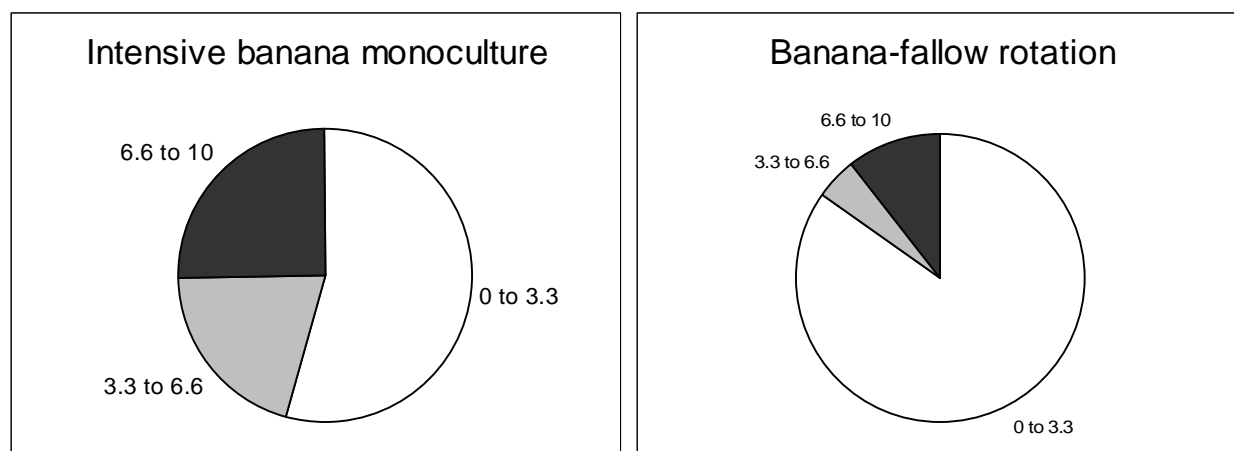


Fig. 13. Rpest percentage scores in three classes (0-3.3; 3.3-6.6 and 6.6-10) for an intensive banana monoculture and for a banana-fallow rotation cropping system.

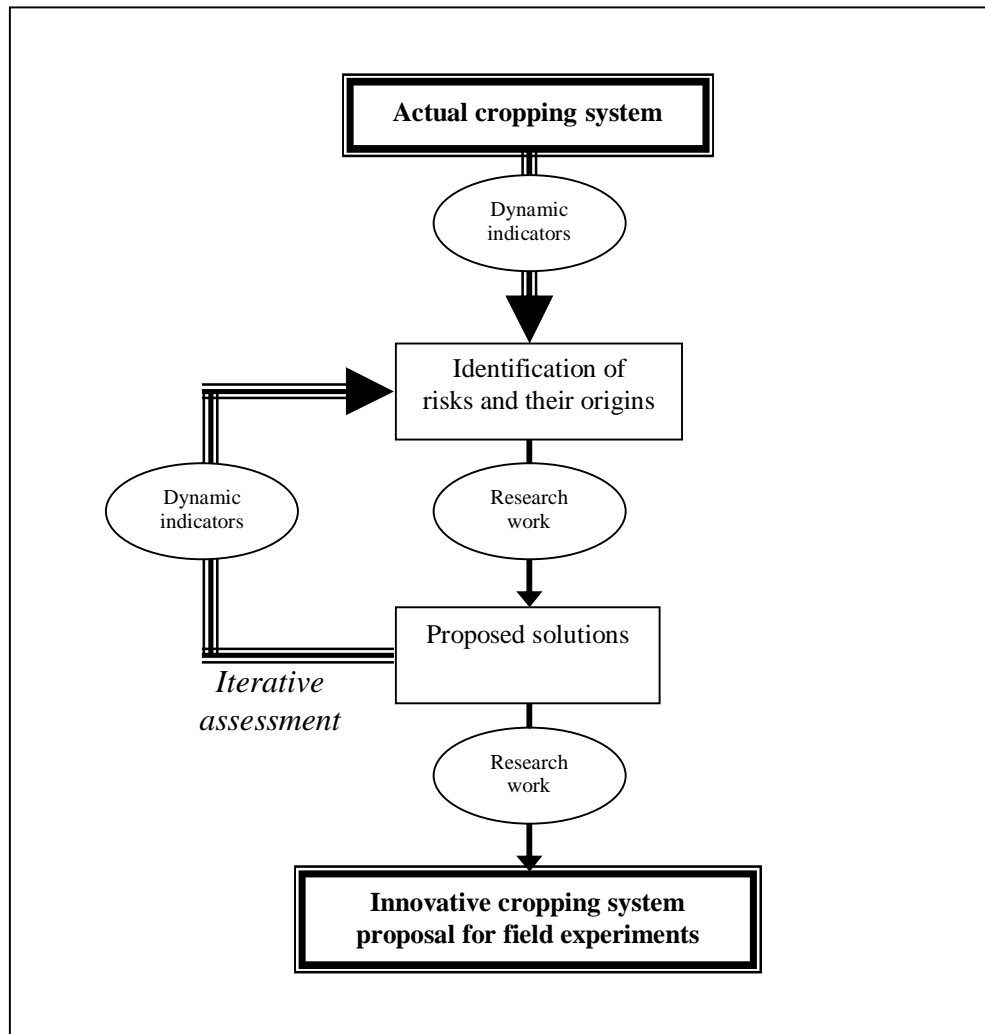


The method proposed for environmental assessment of cropping systems represents a new efficient tool to help scientists and agronomists in designing sustainable cropping systems. The indicators constructed generate continuous information on variations in cropping systems, thus facilitating the detection of transient risk factors and testing of alternatives. Fig. 14 shows the steps for using dynamic indicators to help develop innovative cropping systems.

The linkage of a cropping system simulation model and environmental risk assessment tools (e.g. indicators) is an innovative methodological approach. Previous authors have proposed to use indicators to assess input variables of crop function models (Meynard et al., 2002). Conversely, we used model outputs to calculate indicators specific to issues that cannot be simulated or are problematic (e.g. pesticides) or for which modeling would generate non-applicable tools. Some authors as (Belcher et al. 2004) have already used this approach but for yearly results (e.g; organic matter content in soil) but not in dynamic way. Modeling is therefore not "the only or even major tool", but rather just one strategy to facilitate the development of more sustainable cropping systems (van Ittersum and Donatelli, 2003).

This indicator is currently limited by the fact that it is based on current knowledge on active ingredient transport, but this problem should soon be overcome with the enhancement of knowledge in this field. The limits of Rpest mainly concern the fact that the outputs are qualitative and not quantitative, so accurate guidelines cannot be drawn up to help stakeholders achieve goals with respect to authorised pesticide concentrations in runoff or drainage water. Rpest was designed to compare the risks of different cropping systems but not to simulate active ingredient concentrations in water. It would now be very interesting to make spatial representation of Rpest so as to be able to view and assess the impact of changes in cropping practices on a regional level.

Fig. 14. Proposal for using a dynamic indicator to prototype more sustainable cropping systems.



References

- Ator, S.W., Denver, Judith, M., and Pitchford, A.M. 2000. (EPA) Developing Landscape-Indicator Models for Pesticides and Nutrients in Streams of the Mid-Atlantic Coastal Plain. 4.
- Belcher, K.W., Boehm, M.M., Fulton, M.E., 2004. Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural Systems* 79, 225-241.
- Boiffin, J., Malezieux, E., Picard, D., 2001. Cropping systems for the future. In "Crop science: progress and prospects" CAB international (eds. J.Nosberger, HH. Geiger, PC Struick), 267-279.
- Bockstaller. C., Girardin, P., Van der Werf, H., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Europ. J. Agro.* 7, 261-270.
- Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agric. Syst.* 76, 639-653.
- Bonan, H., Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n°2001-070, 77p.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonielli, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machel, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18, 311-346.
- Cornelissen, A.M.G., van den Berg, J., Koops, W.J., Grossman, M., Udo, H.M.J., 2001. Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86, 173-185.
- Freissinet, C., Cunge, J., Erlich, M., Vauclin, M., 1998. CNFGG Rapport quadriennal 95-98. 261-268.
- Girardin, P., Bockstaller. C., Van der Werf, H., 1999. Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *J. Sustain. Agric.* 13, 5-21.
- Girardin, P., Bockstaller. C., Van der Werf, H., 2000. Assessment of potentiel impacts of agricultural practices on the environment: the AGRO*ECO method. *Environmental Impact Assessment Review* 20, 227-239.
- Guibaud, G., Baudu, M., Ayele, J., 1999. Etude du transfert par ruissellement et par drainage de pesticides utilisés sur un verger de pommier. *J. Européen Hydrologie* 29, 171-187.
- Guipponi, C., 1998. Environmental evaluation of alternative cropping systems with impact indices of pollution. *Europ. J. Agron.* 8, 71-82.
- Jamet, P., Piedallu, M.,A., 1980. Comportement des nématicides organophosphorés et des carbamates dans le sol et la plante étude bibliographique. *Phipatrie Phitopharmacie* 29, 175-199.
- Le Bissonnais 1996 Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Europ. J. Soil Science* 47, 425-437.
- Lefroy, E., Rydberg, T., 2003. Energy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. *Ecol. Model.* 161, 195-211.
- Matthiessen, J., 2001. Accelerated degradation of nematicides used on citrus in South Africa. CSIRO Report 3, September 2001, 2 p.
- Meynard, J. M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M. H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817-829.

- Phillis, Y.A., Andantiatsaholiniaina, L.A., 2001. Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecol. Econom.* 37, 435-456.
- Reus, J., Leendertse, P., Bockstaller, C., Fomsgaard, I., Gutsche, V., Lewis, K., Nilsson, C., Pussemier, L., Trevisan, m., Van der Werf, H., Alfarroba, F., Blümel, S., Isart, J., McGrath, D., Seppälä, T., 2002. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90, 177-187.
- Rigby, D., Woodhouse, P., Young, T., Burton, M., 2001. Constructing a farm level indicator of sustainable agricultural practice. *Ecological Economics.* 39, 463-478.
- Riley, J., 2001. Indicator quality for assessment of impact of multidisciplinary systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 87, 121-128.
- Sánchez-Bayo, F., Baskaran, S., Kennedy, I.R., 2002. Ecological relative risk (EcoRR): another approach for risk assessment of pesticides in agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91, 37-57.
- Silvert, W., 2000. Fuzzy indices of environmental conditions. *Ecol. Model.* 130, 111-119.
- Simon-Sylvestre, G., Fournier, J.C., 1980. Les nématicides et la microflore des sols. *Phytotriatrie-phytopharmacie* 29, 161-172.
- Smith, C., McDonald, G., 1998. Assessing the sustainability of agriculture at the planning stage. *J. Environ. Management* 52, 15-37.
- Smith, O. H., Petersen, G. W., Needelman, B. A., 2000. Environmental indicators of agroecosystems. *Advances in Agronomy* 69, 75-97.
- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. Accepted in *Ecological Modelling* (January 2004).
- Van der Werf, H.M.G., Zimmer, C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 25-49.
- Van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 131-145.
- van Ittersum, M. K., Donatelli, M., 2003. Modelling cropping systems - highlights of the symposium and preface to the special issues. *Europ. J. of Agro.* 18, 187-197.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Europ. J. Agro.* 7, 235-250.
- Zheng, S., Q., Cooper, F., F., 1996. Adsorption, desorption, and degradation of three pesticides in different soils. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 30, 15-20.

2.2. Indicateur de risque d'érosion

Le risque d'érosion est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction entre des caractéristiques locales d'état du milieu et du climat. Sur les sols volcaniques de Guadeloupe (andosols) le ruissellement est généré par une saturation progressive du profil lorsque la pluviométrie excède la capacité d'infiltration des horizons les moins perméables et non à cause d'un colmatage de la porosité superficielle par battance (Le Bissonnais 1996 ; Dorel 2001). L'érosion sur les andosols est principalement due au déplacement sur des courtes distances de particules de sol agrégées. Le travail du sol, la mécanisation ainsi que les cycles d'humectation et dessiccation permettent d'expliquer la génération de ces agrégats susceptibles de se déplacer (Khamsouk 2001 ; Khamsouk et al. 2002). La modélisation du phénomène d'érosion dans de tels systèmes n'a pas donné de résultats très satisfaisants selon les approches de type équation universelle de perte de sol par érosion (Wishmeier et Smith 1978) ou sa version améliorée (Revised Universal Soil Loss Equation, RULSE ; Renard et al. 1997).

L'indicateur du risque d'érosion (Rero) est évalué par trois sous-indicateurs en cascade (**Fig. III-1.**). Dans un premier temps, la capacité du milieu à générer des chemins d'eau préférentiels est évaluée (ruissellement potentiel : Rrp) qui intègre des variables d'état du milieu (**Tableau III-2.**). Les précipitations, l'état structural du sol, sa couverture et la topographie de la parcelle sont les principales variables explicatives du déplacement de la lame d'eau (Wezel et al. 2002). Le risque de générer une lame d'eau ainsi que la capacité du milieu à la déplacer dans des chemins d'eau préférentiels sont évalués dans l'indicateur de risque de ruissellement réel (Rrr) en agrégeant des variables d'état, climatiques et le risque de ruissellement potentiel (Rrp). L'indicateur de risque érosif (Rero) intègre le risque de ruissellement réel susceptible de déplacer des particules de sol, la capacité du sol à fournir des particules mobiles (compaction globale du sol) et la couverture du sol qui est le principal facteur limitant les déplacements de particules de sol. La **Fig. III-2.** présente l'organigramme expert permettant d'agréger par ESFL les variables des indicateurs Rrp, Rrr et Rero. Les variables nécessaires au calcul de ces indicateurs ainsi que les limites des classes floues associées sont présentées dans le **Tableau III-2.**

Tableau III-2. Liste des variables utilisées dans les indicateurs Rrp, Rrr et Rero

Variables (unité)	Origine	Limites classe floue	Courbe classe floue	Importance relative (%)
<i>Variables liées au ruissellement potentiel (Rrp)</i>				
Sens de la culture (degrés °)	Pratique culturale	90° - 0°	Sigmoïde	40
Pourcentage de couverture du sol (%)	Modèle biophysique	100% - 0%	Droite	40
Profondeur des sillons (mètres m)	Modèle biophysique	0,0 - 0,5	Seuil	10
Niveau de compaction globale du sol (note/10)	Modèle biophysique	0 - 10	Sigmoïde	10
<i>Variables liées au ruissellement réel (Rrr)</i>				
Risque de ruissellement potentiel Rrp (note/10)	Sous indicateur	0 - 10	Sigmoïde	30
Précipitation hebdomadaire (mm)	Donnée climatique	0 - 500	Sigmoïde	40
Pente de la parcelle (degrés °)	Donnée parcellaire	0 - 90°	Sigmoïde	30
<i>Variables liées à l'érosion (Rero)</i>				
Risque de ruissellement réel Rrr (note/10)	Sous indicateur	0 - 10	Sigmoïde	30
Compaction du sol (note/10)	Modèle biophysique	0 - 10	Sigmoïde	30
Pourcentage de couverture du sol (%)	Modèle biophysique	100% - 0%	Sigmoïde	40

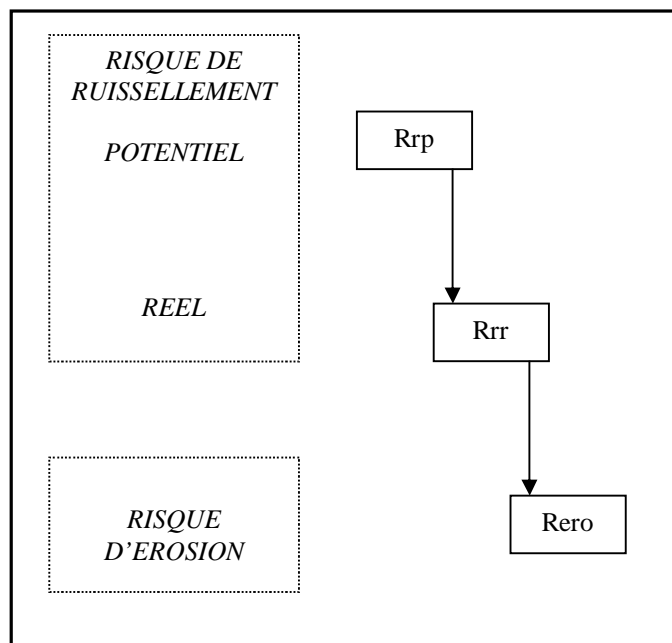
Fig. III-1. Arborescence de l'indicateur érosion Rero.

Fig. III-2. : Organigrammes de notation des différentes combinaisons d'état des variables pour le calcul des sous-indicateurs de risque de ruissellement potentiel et réel et d'érosion.

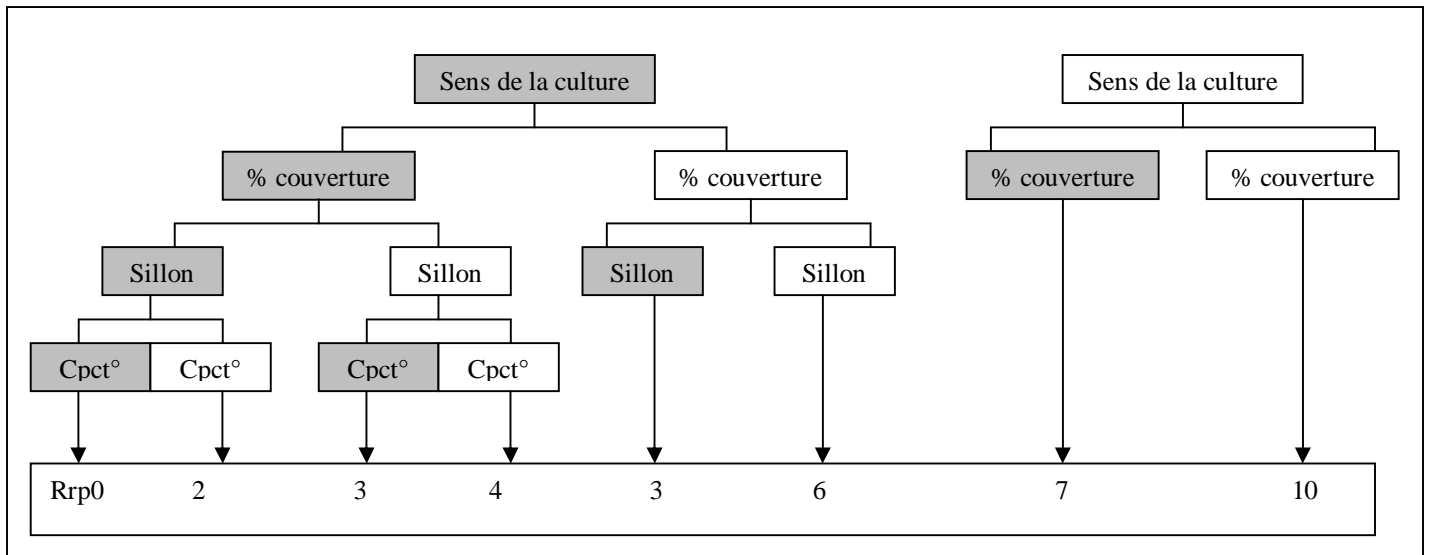


Figure 7a : Arbre de décision relatif au Risque de ruissellement potentiel (Rrp)

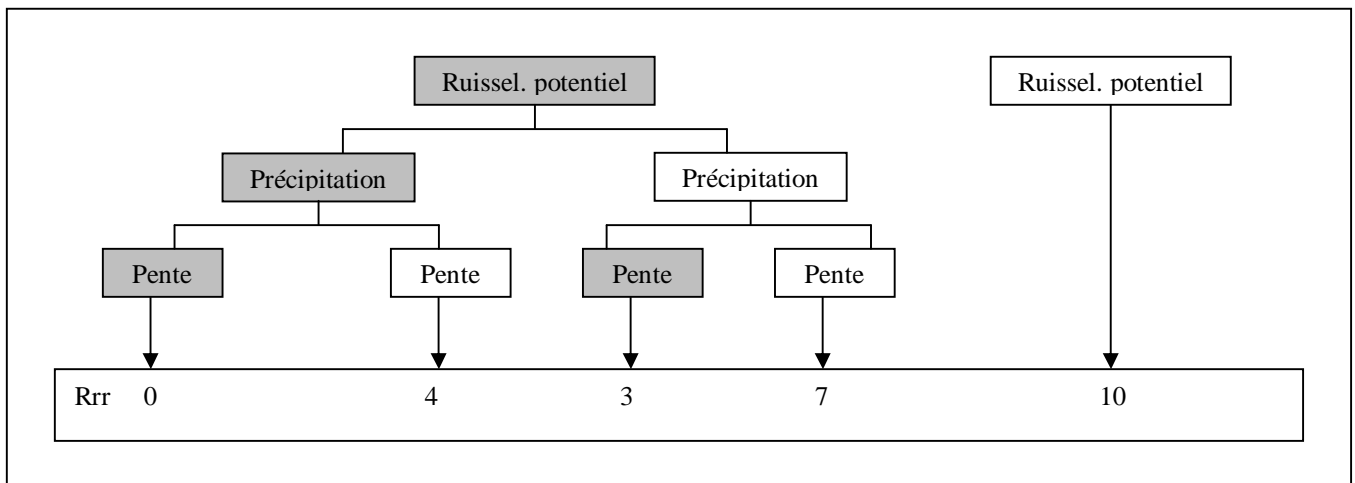


Figure 7b : Arbre de décision relatif au Risque de ruissellement réel (Rrr)

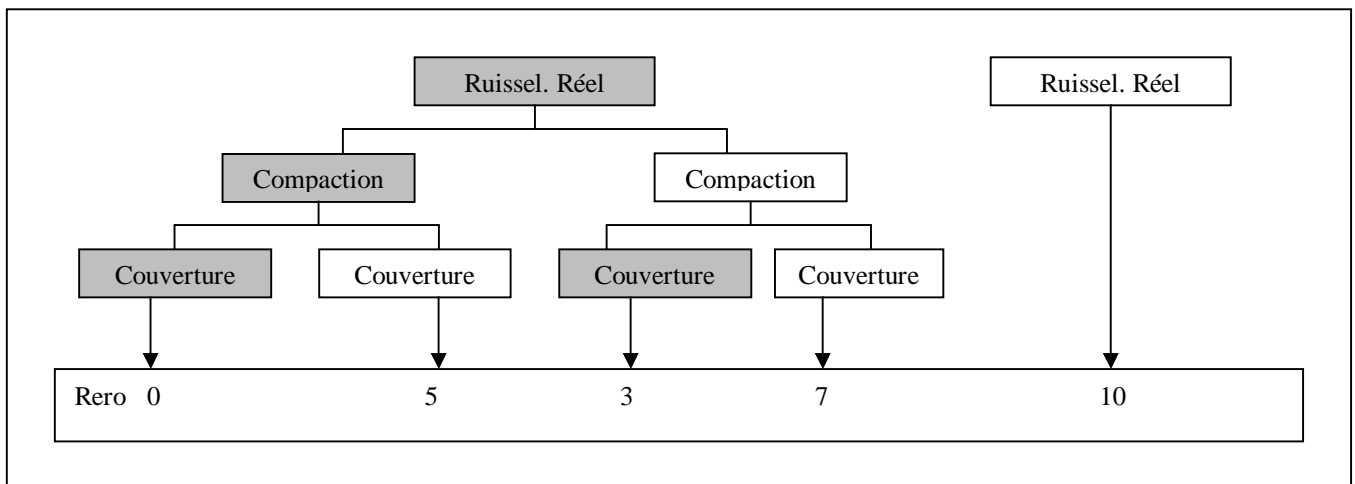


Figure 7c : Arbre de décision relatif au Risque d'érosion (Rero)

Les **Figures III-3** et **III-4** présentent l'analyse de sensibilité de Rero en fonction de la variation de la pente et du régime pluviométrique.

Fig. III-3. Analyse de sensibilité des indicateurs de risque érosif (Rero) à la variation de la pente.

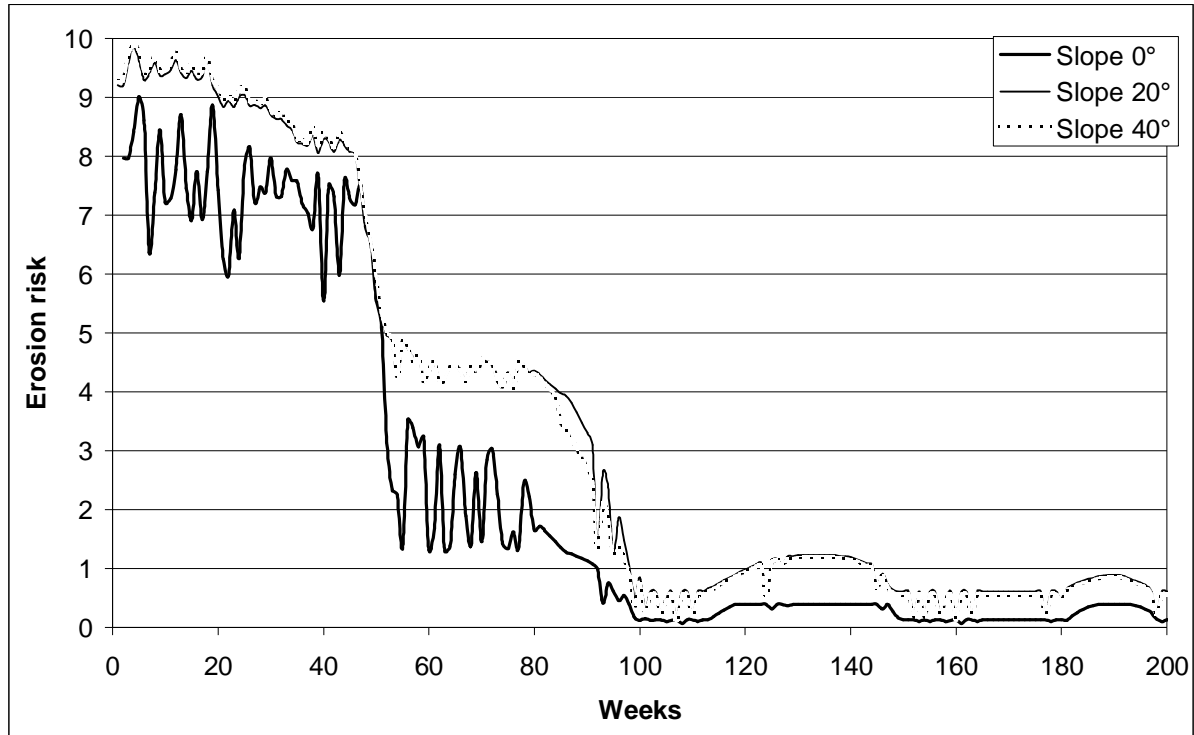


Fig. III-4. Analyse de sensibilité des indicateurs d'érosion (Rero) à la variation de la pluviométrie (Altitude faible = pluviométrie limitée ; altitude forte = pluviométrie importante).

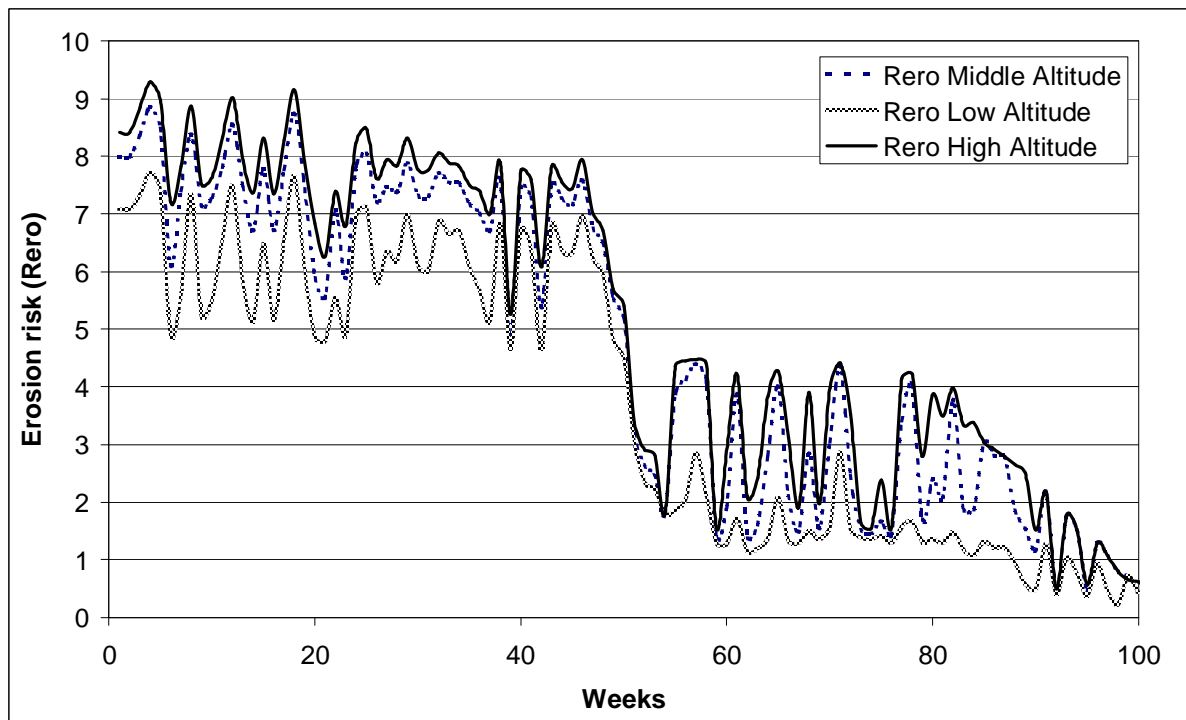
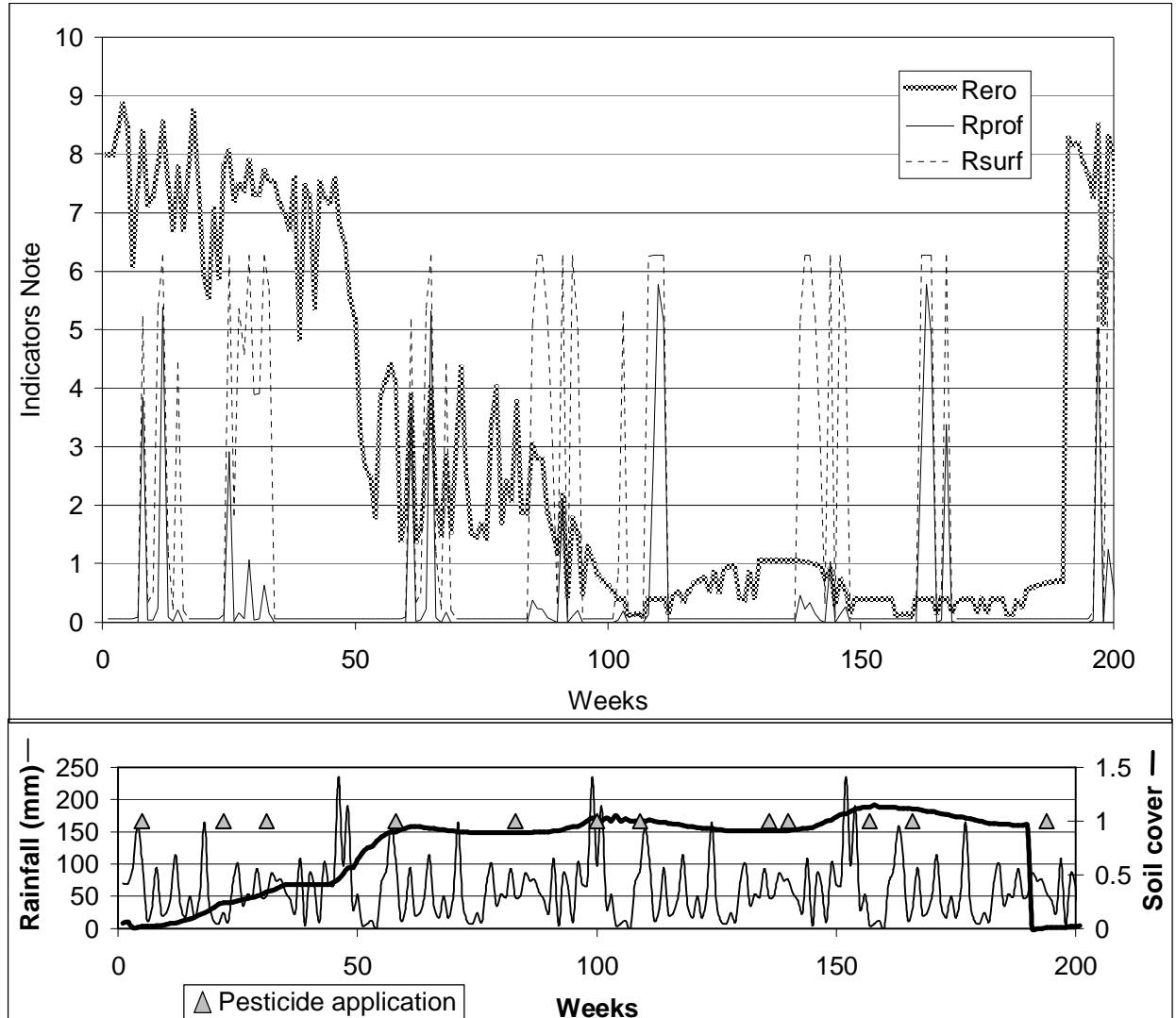


Fig. III-5. Note des indicateurs de risque d'érosion (Rero) et de risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires (Rgrow ; Rsurf) pour un système de culture intensif en monoculture de bananiers et les données principales d'entrée (précipitation, couverture du sol, apports de produits phytosanitaires).



2.3. Indicateur de fertilité des sols

La notion de fertilité des sols a évolué au cours du temps. C'est son rôle fonctionnel qui est de plus en plus considéré, c'est-à-dire le rôle du milieu dans les processus de production, son aptitude culturale (Sébillotte, 1982). Outre les conditions climatiques qui définissent les potentialités de production, ce sont bien les caractéristiques physiques (stabilité structurale, transferts hydriques...), chimiques (teneur en éléments minéraux...) et biologiques (rôle dans la nutrition des plantes, stock de matière organique, parasitaire...) du sol qui constituent les différentes composantes de la fertilité (Pieri, 1989).

La construction d'un indicateur intégré de fertilité doit prendre en compte ces 3 composantes. Trois sous indicateurs ont été construits pour évaluer chacune des composantes de la fertilité des sols.

2.3.1. Indicateur de la composante physique de la fertilité (Rfert-p)

La composante physique de la fertilité dépend notamment de la porosité du sol et de sa capacité à retenir l'eau (Subbian et al. 2000 ; Dorel et Perrier 1990). En ce qui concerne la culture du bananier, l'aération du sol est primordiale pour une bonne croissance des racines (Champion et Sioussaram, 1970 ; Lassoudière 1978^a ; Gousseland 1983). Les propriétés physiques sont la résultante de la minéralogie du sol et des pratiques associées. Dans le cadre d'un indicateur destiné à comparer des systèmes de culture, nous n'examinerons que l'effet des pratiques sur la composante de la fertilité. C'est la porosité qui joue le rôle le plus important, elle influe sur la capacité de rétention en eau, la conductivité hydraulique et l'aération du sol. Le travail du sol et la mécanisation représentent les principaux facteurs anthropiques qui modifient la porosité du sol. Les structures de sol générées par ces pratiques (terre-fine, mottes Γ et mottes Δ ; Manichon 1982) ont des aptitudes très différentes à accueillir les racines du bananier et à fournir eau et éléments minéraux (Dorel 2001).

La comparaison de 2 situations bien contrastées : i) forte mécanisation avec replantations fréquentes et ii) pérenne a permis de mettre en évidence le rôle de la mécanisation dans la structuration de l'horizon cultivé avec des mottes Δ très compactées et des zones de terre-fine (Dorel 2001). Ces structures ne sont pas favorables au développement des racines du bananier. Dans les cultures 'pérennes' sans mécanisation la structure est homogène et

favorable aux racines. Le nombre de passage annuel d'outils de labour et d'engins mécanisés semble donc être un bon indicateur de l'état structural du sol. Cette variable est considérée comme favorable quand elle est égale à '0' et complètement défavorable quand elle est supérieure à '4'. Entre ces 2 valeurs une classe floue est définie avec une réponse linéaire. La **Fig. III-6.** présente la note de l'indicateur d'évaluation de la fertilité physique du sol en fonction de la variation de cette variable.

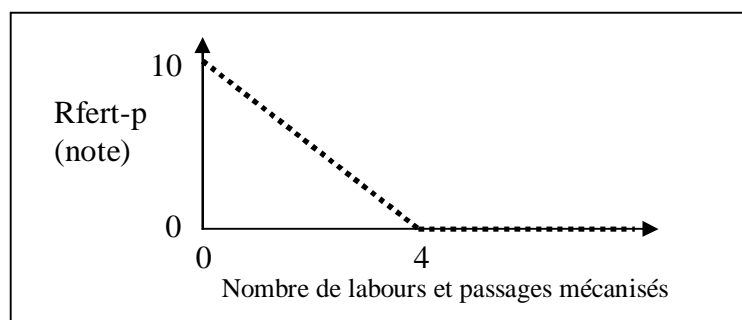


Fig. III-6. Variation de la note de l'indicateur d'évaluation de la fertilité physique du sol (Rfert-p) en fonction de la variation du nombre de labour et de passages mécanisés.

2.3.2. Indicateur de la composante chimique de la fertilité (Rfert-c)

La composante chimique de la fertilité correspond à la capacité du milieu à fournir à la plante des éléments minéraux. Il est reconnu que cette capacité du sol est intimement liée à la matière organique qu'il contient (Feller 1995). Elle joue un rôle énergétique et nutritionnel primordial (Leclerc 2001) en plus d'un rôle sur le contrôle de la structure du sol, avec le renforcement des structures légères et l'allègement des structures lourdes (Guérif 1982) ainsi que sur la formation d'agrégats de sol (Soltner 1987). Elle intervient à travers quatre fonctions principales :

- en tant que substrat carboné, elle constitue une source trophique pour les organismes (et notamment les micro-organismes) vivant dans le sol,
- elle détermine les propriétés d'échange et de sorption liées aux propriétés de surface des constituants organiques et organo-minéraux du sol. Les réserves en bases échangeables (Ca, Mg, K, Na), le pouvoir fixateur du sol vis-à-vis des ions

phosphate, les phénomènes d'adsorption et de désorption de molécules organiques telles que les produits phytosanitaires sont le reflet de ces propriétés,

- elle permet le stockage à long terme d'éléments tels que le phosphore ou les cations majeurs (K, Ca, Mg) (Russell, 1973 ; Woomer et Ingram, 1990). La libération de ces éléments est liée à la dynamique de minéralisation de la matière organique,
- elle joue un rôle important sur l'agrégation des constituants du sol et sur des propriétés physiques telles que la porosité, la stabilité de la structure, la conductivité hydraulique, l'aération, la capacité de stockage de l'eau et ainsi que la sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion.

Les systèmes de culture sont susceptibles de modifier le statut organique des sols tropicaux à travers :

- la dynamique, la quantité, la composition et la localisation des résidus de culture (Mellilo et al., 1982 ; Cuevas et Medina, 1988 ; Palm et Sanchez, 1991),
- le travail du sol et diverses pratiques de gestion des couverts végétaux (Ayanaba et al., 1976 ; Ayodele, 1986 ; Follett et Schimel, 1989 ; Subbian et al., 2000),
- les apports de produits phytosanitaires et leur effet sur l'activité biologique du sol.

Des travaux réalisés en Guadeloupe, ont montré l'effet de l'introduction de la canne à sucre dans les systèmes de culture bananiers et de la mécanisation de la culture sur les caractéristiques de la MOS et notamment sur l'importance de la biomasse microbienne (Lombard, 2003). Les travaux de Feller (1994) sur la matière organique des sols tropicaux donnent la base méthodologique d'une approche de la matière organique du sol reposant sur le fractionnement granulométrique.

Les différentes fractions de la matière organique des sols (litière pouvant être métabolisée et MOS structurale, microbienne, labile et liée) ne sont pas concernées par les mêmes processus et suivent des dynamiques différentes avec des taux de renouvellement variant de la semaine au millénaire (Woomer et al., 1994). Diverses approches de modélisation de ces phénomènes complexes ont été développées depuis 50 ans. La plupart ont été mises au point en milieu tempéré. Les modèles les plus simples tel que le modèle Hénin – Dupuis (Hénin 1945 ; Bocchini et al., 2001) simulent annuellement deux compartiments MOS labile et MOS liée.

D'autres modèles plus complexes tels que CENTURY (Parton et al., 1989) nécessitent une calibration plus poussée mais offrent des sorties plus précises (caractérisation des différentes fractions pour le carbone, l'azote et le phosphore) et prennent en compte de manière plus précise le climat avec un pas de temps mensuel. Il existe d'autres modèles, mensuels tel que RothC (Jenkinson et al. 1990) et journaliers tel que CERES-NCSOIL (Molina et al., 1983). Malgré ces acquis il n'existe pas de modèle calibré pour la situation des andosol de la Guadeloupe. Il est donc intéressant d'évaluer cette composante de la fertilité par le biais d'un indicateur intégré.

La **Fig. III-7.** présente une version simplifiée des cycles couplés du carbone et de l'azote dans le sol. Cette figure met en évidence les flux d'entrée et de sortie de ces deux cycles ainsi que les phénomènes impliqués par les actions culturales labours et apports (organiques et azotés). La bonne fourniture de la plante en azote dépend des apports d'azote et de carbone en quantité totale et relative et de la capacité du sol à les conserver.

Pour évaluer le rapport entrées / sorties du système, il semble intéressant de regarder **le ratio (Azote apporté / Azote exporté)**. Ce même ratio est difficilement appréciable pour le carbone du fait qu'il dépend principalement de la fixation photosynthétique et de la minéralisation : 2 termes difficilement estimables. Pour le ratio azote seul la lixiviation et l'humification sont des termes difficilement appréciables.

Le nombre annuel de labours est à priori la principale action culturale qui influe sur l'intensité des phénomènes de minéralisation.

Les deux variables retenues pour l'estimation de la fertilité chimique du sol sont donc le ratio Napporté/Nexporté et le nombre annuel de labours. La **Fig. III-8.** présente le tableau des deux variables de Rfert-c et les seuils à partir desquels elles sont considérées comme favorables et défavorables ainsi que l'arbre de décision permettant de calculer une note pour l'indicateur Rfert-c d'estimation de la fertilité chimique du sol par méthode SELF.

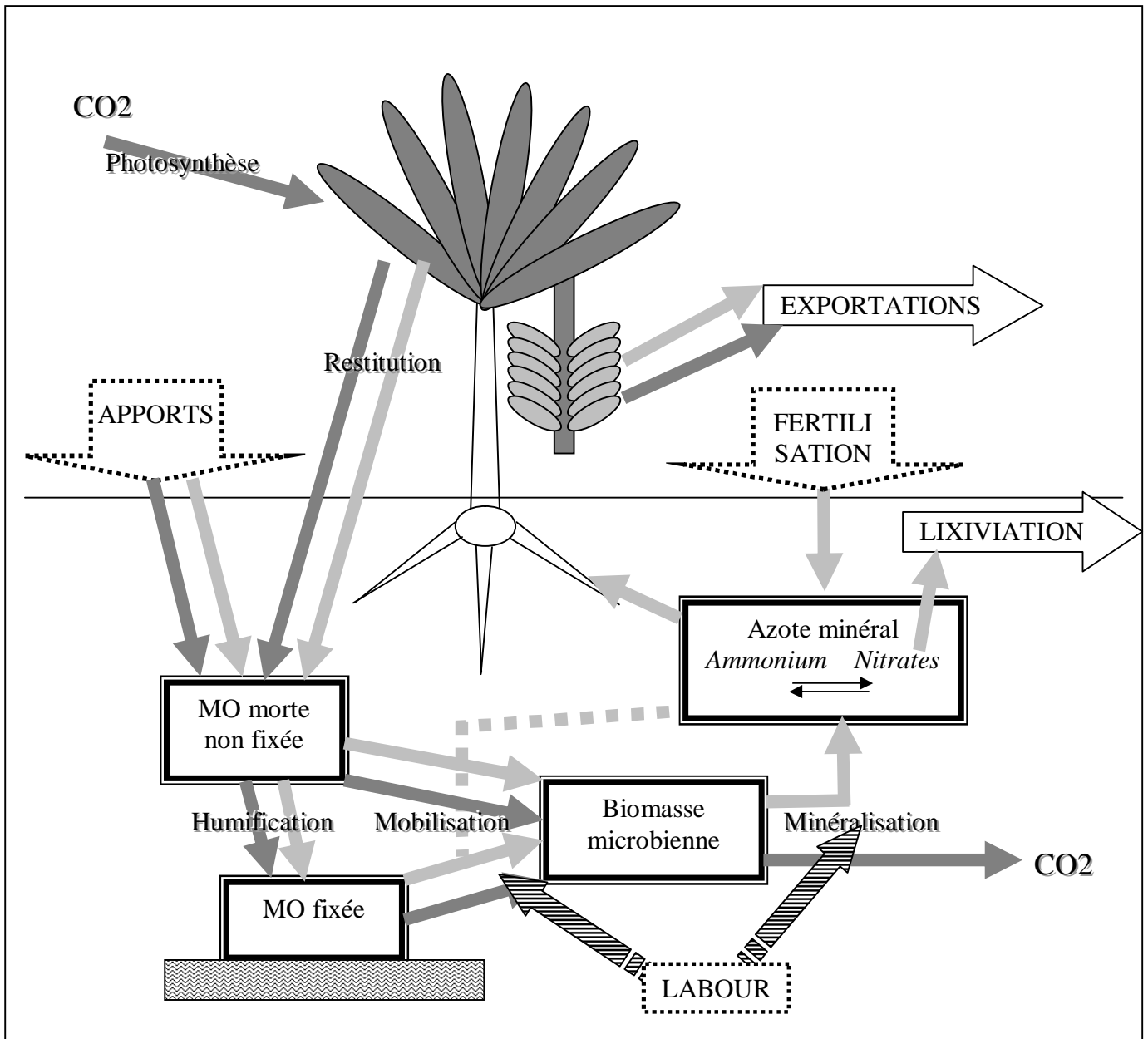
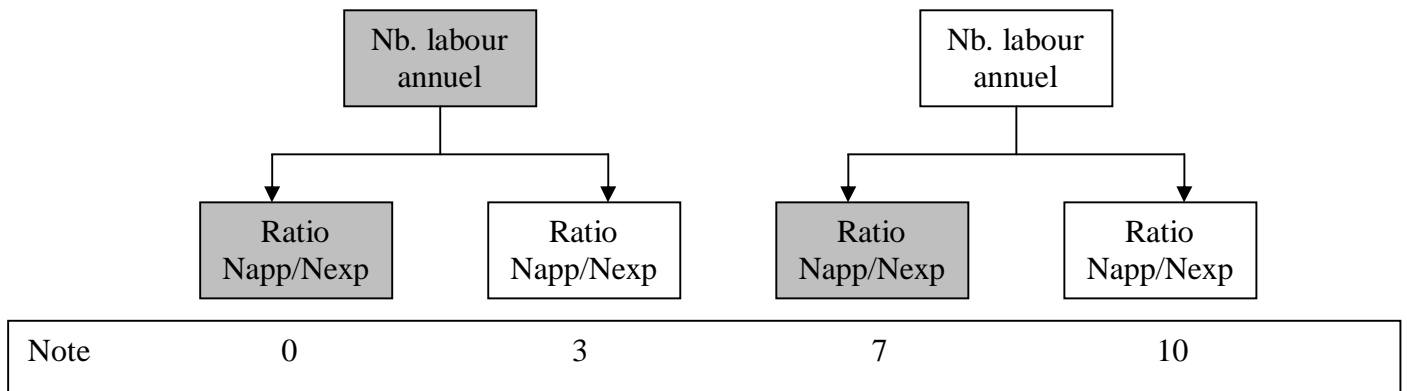


Fig. III-7. Schéma simplifié des cycles couplés du carbone ➡ et de l'azote ➡ dans le sol ainsi que les principaux impacts potentiels des pratiques culturales ➡.

Fig. III-8. Seuil des classes favorables et défavorables pour le calcul de l'indicateur de fertilité chimique R_{fert-c} ainsi que l'arbre de décision associé pour le calcul d'une note selon la méthode SELF.

	Seuil Favorable	Seuil Défavorable
Ratio Napp/Nexp	1.2	0.8
Nb. labours/an	0.1	0.3

Entre les limites des seuils favorables et défavorables une classe floue est définie selon une loi sigmoïdale.



La **Fig. III-9.** présente le tableau des deux variables de R_{fert-c} et les seuils à partir desquels elles sont considérées comme favorables et défavorables ainsi que L'arbre de décision permettant de calculer une note d'estimation de la fertilité biologique du sol par la méthode SELF.

2.3.3. Indicateur de la composante biologique de la fertilité (R_{fert-b})

Dans la composante biologique de la fertilité nous ne traiterons pas de l'ensemble de la biologie du sol, même si elle joue un rôle très important dans la durabilité des systèmes, mais nous nous concentrerons sur l'aspect parasitaire de la fertilité. La composante parasitaire évaluée ici est uniquement celle due aux nématodes phytoparasites de l'espèce *Radopholus similis*.

L'indicateur de fertilité biologique R_{fert-b} a pour but d'évaluer la capacité du milieu à développer ou ne pas développer ces parasites telluriques.

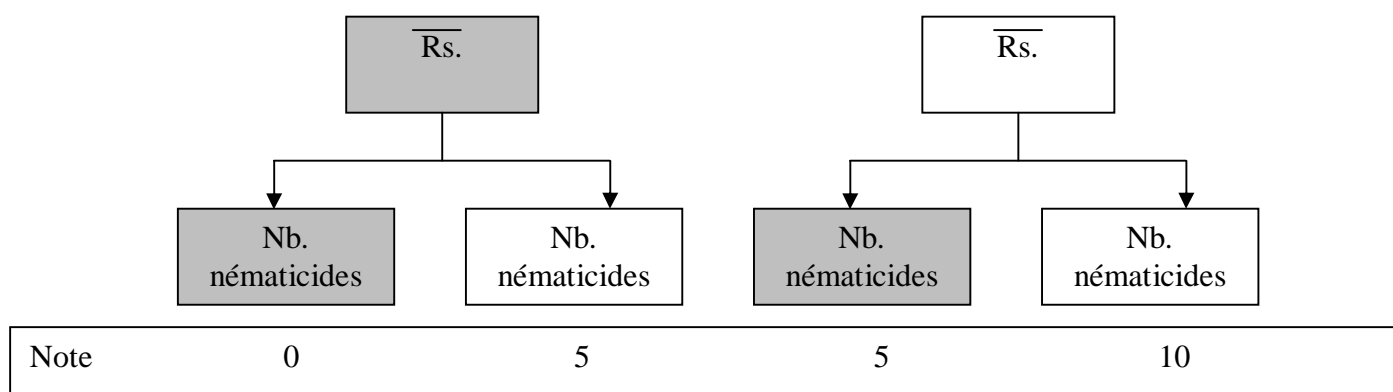
Pour évaluer cette capacité la combinaison de 2 variables est proposée : il s'agit de la moyenne de la concentration en nématodes *Radopholus similis* simulée dans les racines de bananier et du nombre de traitements phytosanitaires réalisés sur l'ensemble du système de culture.

Les seuils utilisés pour la concentration moyenne en *Radopholus similis* (**Figure III-9**) correspondent pour le seuil favorable à une concentration qui ne remet pas en jeu l'avenir de la culture et, pour le seuil défavorable à une concentration considérée comme très nuisible. Les seuils pour la variable 'nombre de nématocides' correspondent à l'absence de traitements pour le seuil favorable et à 3 traitements pour le seuil défavorable ce qui correspond à la recommandation dans le cas d'un système intensif basé sur la lutte chimique. L'arbre de décision montre des notes donnant une importance relative identique aux 2 variables.

Fig. III-9. Seuil des classes favorables et défavorables pour le calcul de l'indicateur de fertilité chimique R_{fert-b} ainsi que l'arbre de décision associé pour le calcul d'une note selon la méthode SELF.

	Seuil Favorable	Seuil Défavorable
Concentration moyenne Rs. (nb. g-1)	30	300
Nb. annuel de traitements nématocides	0	3

Entre les limites des seuils favorables et défavorables une classe floue est définie selon une loi sigmoïdale.



2.3.4. Calcul d'un indicateur global de la fertilité (Rfert)

Un indicateur de fertilité global à l'échelle d'un système de culture doit intégrer les 3 composantes de la fertilité qui ont été définies précédemment. L'importance relative donnée à chacune de ces composantes dépend du point de vue que l'on pose sur la fertilité. Nous avons choisi de donner une importance identique à chacune de ces composantes : le calcul de l'indicateur global de la fertilité se fait en moyennant les 3 notes des sous indicateurs.

$$Rfert = (Rfert-p + Rfert-c + Rfert-b) / 3$$

Cet indicateur a un rôle double, il est utilisé:

- comme critère d'évaluation des systèmes de culture,
- comme indice de stress pour le module de croissance SIMBA-GROW.

Le fait d'utiliser un indicateur intégré et qualitatif pour piloter un module biophysique n'est pas conventionnel mais permet de prendre en compte un certain nombre de connaissances importantes mais dont on ne connaît pas exactement le déterminisme des mécanismes d'action. L'indice de stress de fertilité du système Stress-fert correspond à la note de Rfert divisée par 10. Si la fertilité du système est nulle il n'y a pas de croissance et au contraire si elle est maximale la croissance est au potentiel. Ce stress intervient en plus du stress hydrique 'Stress-hyd'.

L'approche par indicateur est un bon moyen de prendre en compte la grande variété des processus liés à la notion de fertilité qui se déroulent sur des pas de temps très différents (tableau III-3).

Tableau III-3. Phénomènes relatifs à la fertilité des sols cultivés et leur échelle de temps relatives.

Phénomène relatif à la fertilité	Echelle de temps impliqué
Teneur en MOS	5 – 10 ans
Dynamique parasitaire (nématodes)	< 1 an
Structure du sol	instantané et annuel

L'indicateur de fertilité et ses différents sous-indicateurs ont été calculés pour 3 systèmes de culture (simulé avec SIMBA) afin de vérifier leur cohérence avec les connaissances actuelles

de ces systèmes. Les 3 systèmes de culture (système intensif de monoculture de bananiers avec replantation fréquente, rotation bananiers (5ans) jachère (1an) plantation sans travail du sol, et rotation bananiers (5 ans) canne à sucre (3ans) plantation avec travail du sol) ont été simulés dans des conditions pédoclimatiques identiques (côte au vent de la Guadeloupe, andosol, 250 mètres d'altitude). Le **tableau III-4** présente les valeurs des différents indicateurs de fertilité pour ces 3 systèmes à l'issue des simulations.

Tableau III-4. Valeur moyenne des indicateurs de fertilité pour 3 systèmes de culture différents, pendant 500 semaines.

Systèmes de culture	Rfert-b	Rfert-c	Rfert-p	Rfert
Monoculture intensive de bananiers avec des replantations fréquentes	2.6	7.0	0.0	3.2
Monoculture semi-intensive de bananiers	1.7	9.8	9.7	7.1
Monoculture extensive de bananiers sans replantations	3.4	10.0	9.7	7.7

Ces 3 systèmes de monoculture ont des fertilités biologiques faibles, ce qui est inhérent à leur nature : des inoculum initiaux en nématodes phytoparasites élevés. La mécanisation lourde du système intensif cause une fertilité physique très faible.

3. Le tableau de bord agri-environnemental

Les indicateurs dynamiques permettent d'évaluer l'évolution au cours du temps des principaux risques environnementaux liés aux systèmes de culture. Ces indicateurs représentent une avancée dans la panoplie des outils destinés à la conception et à la mise au point de systèmes de culture plus respectueux de l'environnement. Ils permettent de raisonner les choix tactiques en les comparant (par exemple gestion des adventices par des produits phytosanitaires herbicides ou passage d'engins mécaniques de désherbage). Reposant à la fois sur des mécanismes biophysiques de fonctionnement des systèmes étudiés (représentés par un

modèle) et sur une approche de type « experte », ils permettent l'intégration de variables de natures différentes.

La méthode d'évaluation environnementale des systèmes de culture proposée constitue un outil nouveau et performant pour les chercheurs et les agronomes en charge des systèmes de culture. Les indicateurs élaborés fournissent des informations continues sur l'évolution des systèmes, permettant à la fois d'identifier des facteurs de risques ponctuels et de tester des alternatives.

Le couplage entre modèle de simulation des systèmes de culture et outils d'évaluation des risques environnementaux, tel que les indicateurs, représente selon nous une innovation méthodologique importante. En effet, des auteurs ont proposé d'utiliser des indicateurs pour estimer des variables d'entrées de modèles de fonctionnement des cultures (Meynard et al., 2002), d'autres de coupler des indicateurs à des modèles simulant les processus décisionnels (Guipponi, 1998 ; Lyon Dahl, 2000). Notre démarche est inverse et utilise des sorties de modèles pour calculer des indicateurs qui portent sur des problématiques dont la modélisation directe n'est pas possible, pose problème ou amènerait à des outils non applicables. Ainsi la modélisation n'est plus « the only or even major tool » mais un des éléments pour la mise au point de systèmes de culture plus durables (van Ittersum et Donatelli, 2003).

Ces indicateurs ont pour limite les connaissances actuelles sur le transfert des substances actives, sur les phénomènes érosifs et sur le concept de fertilité.

4. Conclusion du chapitre III

Les indicateurs de risques environnementaux développés permettent d'évaluer les risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires, les risques d'érosion et d'évolution de la qualité du sol. Ces indicateurs sont basés sur l'agrégation de variables descriptives des phénomènes impliqués et se font par la méthode SELF (Système Expert et Logique Floue) déjà utilisée dans des indicateurs agri-environnementaux (Bockstaller et al., 1997). Les variables utilisées sont principalement des sorties des modules biophysiques de SIMBA. L'évaluation est réalisée de manière dynamique, au pas de temps hebdomadaire, ce qui permet de détecter les périodes de risques, notamment au travers d'un tableau de bord agri-environnemental.

Chapitre IV

Utilisation de SIMBA pour l'évaluation multicritère et la génération de systèmes de culture plus durables

1. Les utilisations possibles de SIMBA

Les modules de simulation et d'évaluation qui forment SIMBA sont susceptibles d'être utilisés de plusieurs manières. L'objectif principal de SIMBA étant, dans le cadre du présent travail, d'aider à la conception de systèmes de culture nous ne développerons pas ici les autres utilisations possibles (pilotage et prévision).

Un modèle global comme SIMBA permet d'aborder des systèmes existants en les évaluant et en les optimisant. Il permet également de générer des systèmes innovants (dans le sens de nouveaux assemblages de pratiques). Les méthodologies mises en œuvre doivent être en accord aussi bien avec l'objectif (précision nécessaire dans les sorties) qu'avec les contraintes techniques (temps de simulation nécessaire à la résolution). En effet, bien que les pratiques soient décrites par des règles de décision, leur nombre est grand, ceci à pour effet que le nombre possible de combinaisons des règles de décision est très important. Il est donc primordial de bien choisir celles qui seront testées ainsi que la gamme et le nombre de valeurs testées pour chacun des paramètres de ces règles de décision.

Dans le cas de SIMBA une méthodologie basée sur 2 étapes a été développée : i) définir des 'tendances durables' puis, ii) optimiser les systèmes les plus prometteurs.

1.1. Concevoir des systèmes de culture pour définir des tendances

La définition de tendances 'durables' à l'aide d'un modèle consiste à tester ensemble les principales règles de décision définissant le système de culture. Cette étape correspond à une exploration exhaustive des combinaisons possibles de règles de décisions. Une fois les simulations réalisées les différents jeux de règles de décision sont triés suivant des points de vue favorisant les performances économiques, agronomiques ou environnementales. Une analyse des systèmes les plus prometteurs doit permettre de définir une ou plusieurs tendances durables pour un point de vue donné. Il s'agit par exemple de chercher le niveau

d'intensification des principales pratiques (replantation, mécanisation, fertilisation, traitements phytosanitaires).

1.2. Optimiser des pratiques pour des systèmes existants ou innovants

L'optimisation d'un système consiste à chercher pour une règle de décision donnée, dans le cadre d'un système de culture défini, les paramètres de cette règle qui répondent le mieux au point de vue fixé. Du fait qu'une seule règle de décision est prise en compte, il est possible de tester un grand nombre de valeurs pour les paramètres de la règle testée et de prendre en compte la variabilité climatique. Cette seconde étape dans le processus de prototypage proposé permet d'optimiser aussi bien des règles de décision stratégiques (replantation, rotations) que tactiques (application de produits phytosanitaires, de fertilisants,...).

2. Exemple de prototypage avec SIMBA (article)

L'article qui suit (soumis en novembre 2004 à la revue 'European Journal of Agronomy') présente un exemple concret d'utilisation de SIMBA pour aider au prototypage tactique et stratégique de systèmes de culture à base de bananiers. SIMBA est utilisé selon les deux méthodes présentées au paragraphe 1 de ce chapitre : exploration exhaustive des combinaisons pour définir des tendances de systèmes durables et optimisation précise de certaines pratiques (recommandations aux planteurs ou définition de systèmes particulièrement intéressants à tester au champ).

SIMBA: a comprehensive model for evaluation and prototyping of banana-based cropping systems

Philippe Tixier¹, Eric Malézieux², Marc Dorel¹, Jacques Wery³

1- CIRAD-FLHOR, UMR SYSTEM, 97130 Capesterre - Guadeloupe, French West Indies, France

Tel: + 33 (0)5 90 41 36 87

Fax: + 33 (0)5 90 86 80 77

E-mail address: tixier@cirad.fr; dorel@cirad.fr

2- CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier cedex 5, France.

Tel: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

3- Agro-Montpellier, UMR SYSTEM, TA179/01, 34398 Montpellier cedex 5, France.

Tel: +33(0)4 67 61 57 27

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: wery@cirad.fr

Corresponding author:

Dr. Eric Malézieux

CIRAD, UMR SYSTEM, TA179/01,

34398 Montpellier cedex 5, France

Tel: +33(0)4 67 61 55 46

Fax: +33(0)4 67 61 55 12

E-mail address: malezieux@cirad.fr

Abstract

Monospecific banana (*Musa* spp., AAA group, cv. Cavendish Grande Naine) based cropping systems can have serious detrimental impacts on the environment. In these agrosystems, pesticide treatments can lead to significant risks of surface and ground water pollution, especially in the tropical insular conditions of the French West Indies. A specific model called SIMBA was built to assess these risks and to help design more sustainable cropping systems. SIMBA simulates banana cropping systems during several cropping cycles. It includes sub-models that simulate soil structure, water balance, root nematode populations, yield and economic outputs. Agri-environmental indicators linked to the model allow assessment of potential environmental impacts. The model has been implemented in Guadeloupe and was found to be useful for generating practical recommendations for farmers, and virtual testing of agro-technological innovations or field management strategies. Here the general structure of the tool is presented and a method for prototyping new cropping systems on the tactical and strategic level is proposed.

Key words: banana, cropping systems, crop model, agri-environmental indicators, prototyping

1. Introduction

Worldwide, banana production (*Musa* spp., AAA group, cv. Cavendish Grande Naine) for export is often based on intensive mono-cropping systems that are generally not environment-friendly. The agronomic sustainability of these systems is often hampered by a high degree of root parasitism, including nematodes. Air, soil and water quality may be deteriorated by the frequent application of chemicals used to control these pests, and by soil and plant management practices that may lead to severe erosion. These risks are magnified in fragile tropical insular conditions as in Guadeloupe (F.W.I., 16°15'N, 61°32'W) where inhabited areas, coral reefs and rainforests are located close to agrosystems (Bonan and Prime, 2001). At the same time, the management of manpower, the adaptation to a fluctuating and highly competitive market or the limitation of pesticides uses are major economical problems that endanger the whole production of banana in F.W.I. (Bonin et al., 2004).

In this intensive agriculture setting, it is essential to design new cropping systems to address the needs of farmers, decision makers and the whole society. Several strategies are explored to design innovative cropping systems that could solve these problems, including new practices (sometimes using innovative technologies) or new spatiotemporal arrangements of practices. Vereijken (1997) proposed a methodology for prototyping farming systems involving four steps, respectively: i) analysis and diagnosis; ii) design; iii) testing and improving; and iv) dissemination. Models can be used to improve the design and testing of innovative cropping systems (Boiffin et al., 2001). They allow fast exploration of new combinations of practices and can be used to optimise and evaluate them. Such modelling tools already exist, such as ROTAT, which is designed to facilitate selecting and assessing vegetable-based systems on the basis of erosion and gross margin criteria (Dogliotti et al., 2004). Another model-based approach has already been used to prototype wheat-based cropping systems (Loyce et al., 2002^{a,b}). It simulates and compares cropping systems on the basis of their yield, cost, margin, nitrogen use, pesticide use, seed quality and energy balance. All of these tools are designed to address the specificity of cropping systems and the context. However, most standard existing crop models perform evaluations simply on the basis of a few criteria, such as yield, and thus cannot be used for prototyping. Prototyping always begins

by a thorough survey of the current situation and an assessment of potential future developments. This analysis gives the evaluation criteria and constraints for the innovative cropping systems. It also facilitates choosing the most appropriate model outputs or what further complementary analyses or experiments are required. New concepts, technologies and knowledge are needed to develop and implement tools aimed at designing more sustainable cropping systems. Agronomists must work in multidisciplinary research groups that include modellers, social scientists and plant pathologists working in collaboration with farmers' groups (Boiffin et al., 2001; Meynard et al., 2002). In most cases, both an environmental objective defined by society or authorities and an economic objective defined by the farmer need to be considered. In this context, scientists or agricultural authorities have to set realistic objectives which are often a trade-off between environmental and economic constraints. Different approaches exist that combine evaluation criteria. Some are based on weighting the criteria, their sum or product, such as the analytical hierarchy process (Saaty, 1990). There are also some more complex methods, such as the 'preference ranking organisation method for enrichment evaluation' (PROMETHEE; Brans et al., 1984; Olson, 2001), the 'elimination and choice translating reality' (ELECTRE, Roy and Bouyssou, 1993), or the interactive multiple criteria decision making approach (Romero and Rehman, 1989; De Wit et al., 1988).

In the case of banana-based cropping systems, evaluations have to focus on agronomic performances as well as environmental impacts (mostly risks linked with pesticide dissemination in the environment). The economic results and the overall sustainability of the systems (including long-term soil fertility) also have to be taken into account. To fulfil these objectives, a tool called SIMBA was built to simulate the system and assess its performances and impacts. SIMBA aims at optimizing suitable practices that will combine the dynamics of the state variables of the system (pests, plant population, soils, etc.) in order to reach the fixed objectives. SIMBA was developed to simulate and assess the main environmental risks in banana cropping systems through several cropping cycles. It allows agronomic and environmental assessment of existing or innovative cropping systems in various pedoclimatic situations and is thus a powerful tool for selecting the best cropping system prototypes for on-farm experiments. Outputs are presented in a control panel board to facilitate comparison between systems on the basis of all the dynamic data.

The objective of this paper is to present the methodology and the first results of the model based prototyping we developed for banana cropping systems.

2. Material and Methods

2.1. Model structure

SIMBA includes sub-models that simulate the major biophysical processes involved in the cropping system; it includes plant growth, plant population structure (Tixier et al., 2004^a), physical soil properties and cover, water balance, nematode population densities (Tixier et al., 2004^b). These sub-models are linked to each other and provide agronomic outputs. The outputs of this global biophysical model are used as input data to calculate agri-environmental indicators (Tixier et al., 2004^c) that assess major environmental risks over time, such as water exposure to pesticides (Rpest), erosion (Rero) or soil quality (Rfert). These indicators are based on the aggregation of variables using an expert system and fuzzy logic (Girardin et al., 1999). Linkage of the model outputs and indicators allows a weekly assessment of the system, whereas most existing indicators only enable an annual assessment (van der Werf and Petit, 2002). The erosion risk indicator Rero and the pesticides water pollution risk indicator Rpest are dynamic, and hence allow detection of periods of maximal risk. The risk score generated every week can be integrated over the complete cropping period with a mean score or a distribution of scores by classes, which is a powerful tool for comparing different cropping systems. An additional sub-model integrates the agronomic outputs (yield and manpower) and the economic inputs (selling price of banana) to calculate the economic outputs (profit margin).

Figure 1 shows the general structure of the SIMBA model. Sub-models interact with climate and farmers' practices via decision-rule processes. SIMBA was developed in the STELLA® software environment from High Performance System ® (Lebanon, NH, USA). It runs on a weekly step at the field scale.

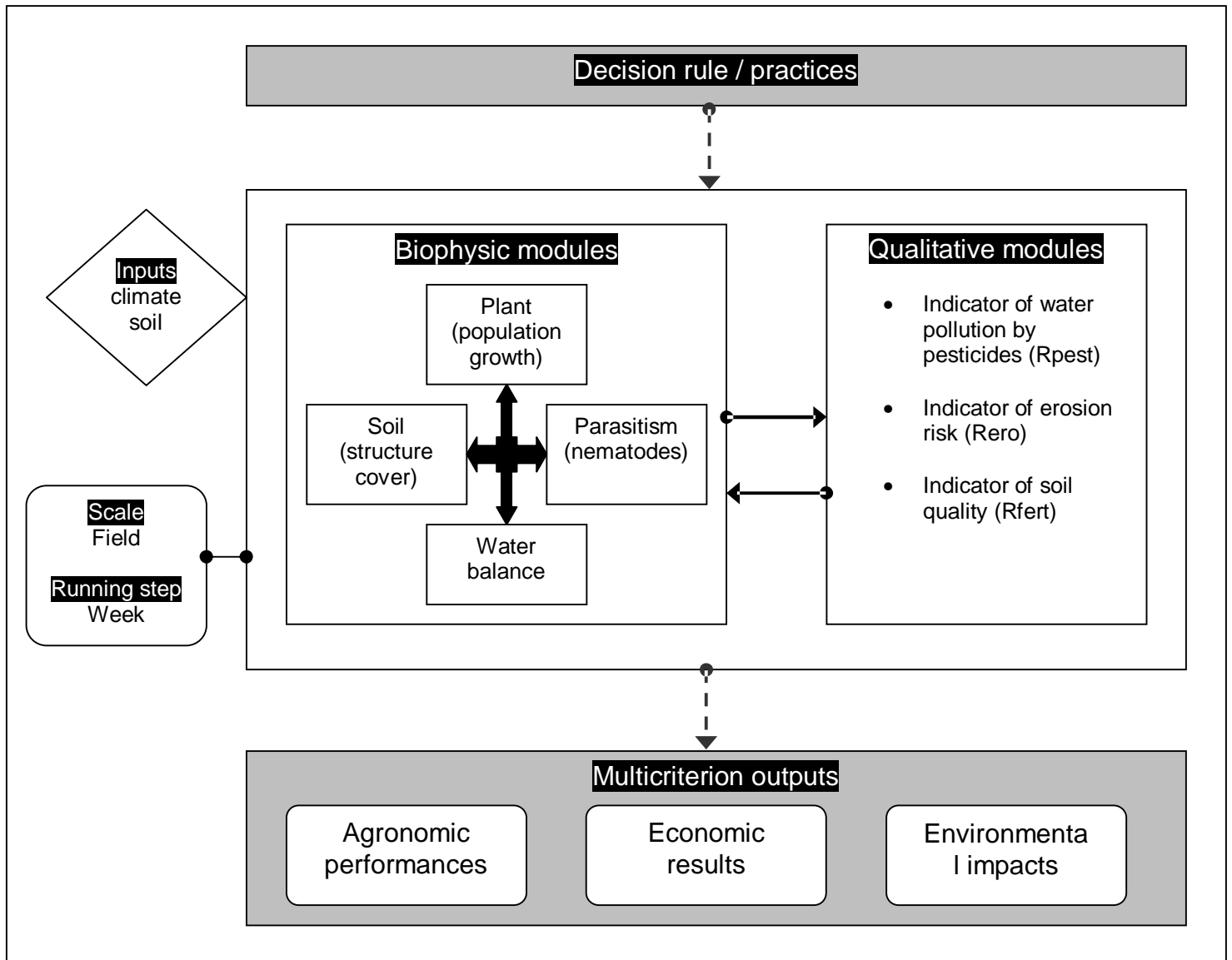
The long-term simulation is essential for assessing banana cropping systems. In a banana field, each plant develops at its own rhythm and the plant population does not follow a synchronous cycle. After planting, a homogenous plant population becomes heterogeneous after a few cropping cycles with plants at different phenological stages at the same time in the field. This process has a marked influence on harvest, water, nitrogen, soil cover and pest dynamics. The SIMBA-POP module (Tixier *et al.*, 2004^a), based on the cohort population

concept, simulates plant population structure and its development patterns, including the management of the plant population by farmer (choice of sucker for next cropping cycle, plant felling and replacement).

In the Growth module, plant growth is calculated separately for each phenological stage (cohort). Potential leaf area (LAI) and biomass production are calculated on the basis of heat units accumulated by each cohort and preset allometric growth ratios. Biotic and abiotic stresses are simulated and reduce the growth potential due to the impact of nitrogen shortage, drought or parasitism. Water balance was designed to take the specific pedoclimatic environment of Guadeloupe (andisol, high rainfall) into account. This module can be used to compute water efficiency and growth stresses.

The SIMBA-NEM module (Tixier et al., 2004^b) simulates nematode populations in banana roots. It integrates root growth, soil water content, soil pesticide stocks and nematode populations and includes trophic competition between nematode species.

SIMBA computes the profit margin calculated with the simulated yield, selling price (which varies throughout the year), inputs and labour costs.

Figure 1. Structure of the SIMBA model.

2.2. Decision rule sets

In most crop models the calendar of practices is not flexible and does not interact with the simulated system. More specific approaches aim at optimising them, e.g. fertilisation decision rules (Makowski and Wallach, 2001) or irrigation decision rules (Bergez et al., 2002). Aubry et al. (1998) proposed a representation of decision rules with conditional coding. In SIMBA, all practices are described by 'decision rules' that are composed by a driven variable, a control variable and an activation threshold or variation range. Such rules are coded with a simple 'if - then - else' algorithm (i.e. the quantity of nematicide applied/week determined by the nematode density or by the number of weeks since the last application; **Figure 2**). Tactical decision rules that apply to the internal functioning of a banana cropping system and strategic decision rules that apply to replanting of banana or rotations with other crops are taken into account via this coding.

Tactical decision rules apply to fertilisation, pesticide application, soil management, plant care and plant population management (**Table 1**). Strategic decision rules apply to replanting of banana and rotations with other crops (**Table 2**).

Tables 1. Tactical decision rules and associated driven and control variables.

Phenomenon	Driven variable	Possible control variable	Range	Nb.
Nematode control	Nematicide application (g.w ⁻¹ .plant ⁻¹)	1. Time since last application (weeks)	10 to 100	10
		2. Percentage of fallen plants (%)	0 to 100	10
		3. Nematode densities (nb. g-1 of roots)	20 to 200	10
Fertilisation	Frequency and weight of nitrogen (g.w ⁻¹ .plant ⁻¹)	1. Time since last application (weeks)	2 to 10	5
		2. forced value of fertilization level (1: high, 2: medium, 3: low)	1 to 3	3
Plant population management	Plant bracing and replacement	1. Percentage of fallen plants (%)	0 to 100	10
		2. Forced values of plant management level (1: high, 2: medium, 3: low)	1 to 3	3
Mechanisation and ploughing	Mechanisation of practices and ploughing	1. Soil compaction score	0 to 10	11
		2. Forced values of mechanisation level (1: high, 2: medium, 3: low)	1 to 3	3

Fertilisation level 1, 2 and 3 correspond, respectively, to a dose of 80, 100 and 130 grams of fertilizer per plant each time and to an application period of 8, 5 and 3 weeks.

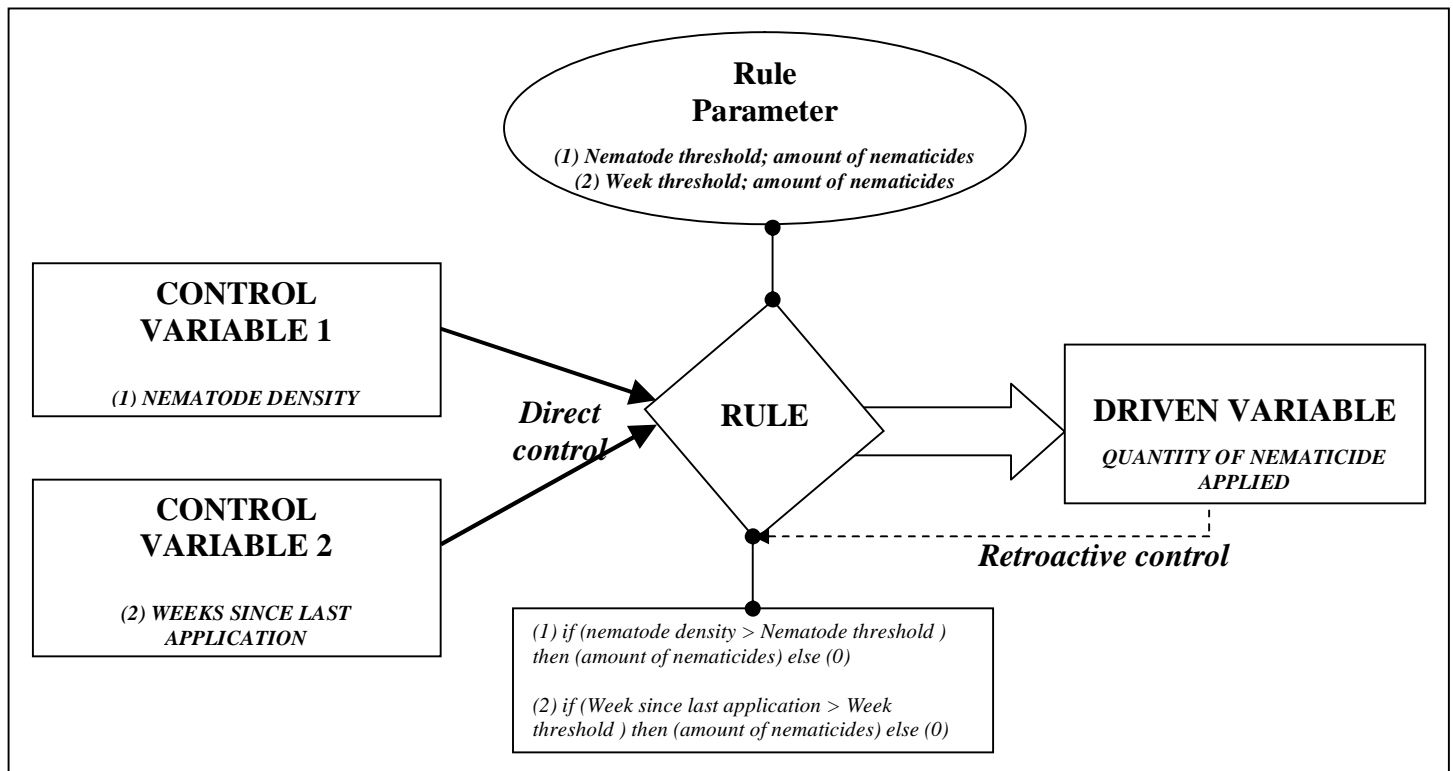
Plant management level 1, 2 and 3 correspond, respectively, to no activation of the replacement of fallen plants, activation of the plant replacement with a threshold of 0.15 and 0.30.

Mechanisation levels 1, 2 and 3 correspond, respectively, to no mechanisation, to the activation the ploughing for planting, and to the activation of ploughing for planting and the use of vehicles for fertilizer supply and harvest.

Tables 2. Strategic decision rules and associated driven and control variables.

Phenomenon	Driven variable	Control variable	Range	Nb.
Planting banana in monocultures	Activate replanting of banana	1. Number of cycles	1 to 15	15
		2. Last cycle yield (kg.cycle ⁻¹)	45 to 10	8
Rotation with sugarcane or fallows	Activate end of banana	1. Number of cycles	1 to 15	15
		2. Last cycle yield (kg.cycle ⁻¹)	45 to 10	8

Figure 2. Structure of a decision rule and its associated control, driven variables and rule parameters (A) and an example of decision rules for the nematicide application (B).



2.3. Multicriterion evaluation

The SIMBA outputs used for the multicriterion evaluation are:

- the profit margin
- the risk of water pollution by pesticides (Rpest indicator)
- the risk of erosion (Rero indicator)
- the soil quality indicator (Rfert indicator)

Some of these outputs are the result of complex aggregation of other sub-model outputs, such as: yield, root biomass, soil compaction, soil cover, phytoparasitic nematode density, leached water volume, labour quantity, etc.

Aggregation of these variables is based on a weighted method. The weight of each variable is presented in **Table 3**. The values of the variables used are re-scaled from their observed

variation range during whole simulations to a 0-10 range, this transformation enables comparison of different variables on the same scale. Four viewpoints are defined, i.e. “only benefit”, “mostly benefit”, “mostly environmental” and “only environmental”. These approaches give relative importance to the profit, which can be 100%, 60%, 30% or 0%.

Table 3. Variables used for the multicriterion assessment and relative weights in the multicriterion evaluation for four different objectives (1: only profit; 2: mostly profit; 3: mostly environmental; 4: only environmental).

Variables	Relative weight in objective			
	1- only profit	2- mostly profit	3- mostly environmental	4- only environmental
Total profit margin (euro.he ⁻¹)	1.00	0.60	0.30	0.00
Mean pesticide risk Rpest (score)	0.00	0.15	0.40	0.60
Mean erosion risk Rero (score)	0.00	0.05	0.10	0.15
Mean soil quality Rfert (score)	0.00	0.10	0.20	0.25

SIMBA can assess monocultures or rotations (e.g. with fallows). An evaluation is not done in the case of rotations, a trade-off score is used. It is calculated by multiplying the “only profit” evaluation score with the “only environment” evaluation score. This ‘trade-off score’ permit to do not select systems with only fallow (or the most environmentally friendly crop) as the environmental evaluation do.

2.4. Method used to prototype cropping systems

SIMBA can be used to test scenarios and assess them in an evaluation procedure. It can also be used in a specific prototyping procedure.

2.4.1. Using SIMBA in an evaluation procedure

The SIMBA model enables evaluation of decision rule sets determined *a priori*. This approach can be used to compare different cropping systems. The control panel presentation

of SIMBA outputs enables a user-friendly approach to simulations and provides a global overview of the simulated system.

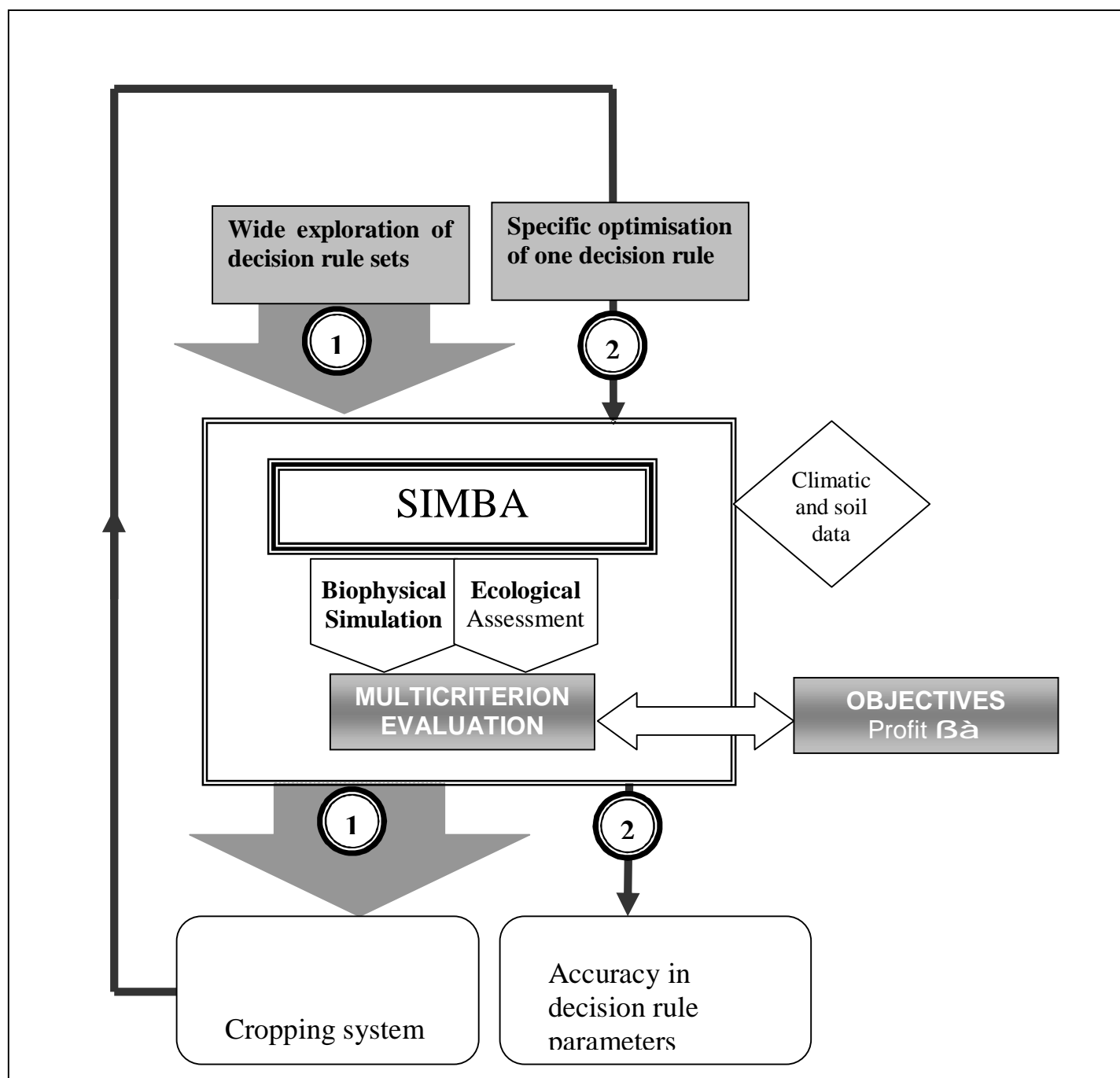
2.4.2. Using SIMBA to prototype

We propose a prototyping method using SIMBA. This 2-step method has two levels of accuracy. First an exhaustive exploration is used to test a wide range of decision rule combinations in order to determine trends in decision rule sets that are sustainable in a particular pedoclimatic setting and for a given objective. This exploration is performed by a specific sub-model that automatically tests a combination of decision rules. After simulation of a high number of decision rules, the ranking and analysis is done in three steps:

- Ranking the systems according to the selected objective.
- Eliminating unfeasible cases that the model could generate (unusual).
- Analysing the most suitable systems in order to highlight trends (if there is one or more).

This approach could generate some general information about practice combinations that could promote sustainability or unsustainability. After the trends are determined, some of the decision rules (strategic or tactical) can be optimised one-at-a-time with higher accuracy (step two). Specific tests are particularly interesting for testing different control variables in order to find the most suitable one. This second step is used to accurately determine decision rules that should be tested on-farm or to come up with suitable recommendations for farmers. This 2-step method enables model-based prototyping and can pinpoint cropping systems that should be field tested. These two steps are presented within the framework of SIMBA in **Figure 3**.

Figure 3. Prototype banana cropping systems using a 2-step SIMBA process: 1- Broad based prototyping of all decision rules. 2- Accurate optimisation of each decision.



2.5. Validation

Validation of the whole model is complex due mostly to the fact that there is a high number of outputs. SIMBA aims to sort cropping systems on the basis of their economic, agronomic and environmental characteristics, so absolute output values are not fundamental, contrary to relative output values. In this context, numerical validation is not very suitable and is almost impossible due to the high volume of data that would have to be collected. Each module has been separately validated numerically using data from Guadeloupe, such as the crop population module (SIMBA-POP; Tixier et al., 2004^a), the phytoparasitic population module (SIMBA-NEM; Tixier et al., 2004^b) or the pesticide risk indicator (Rpest; tixier et al., 2004^c). This module by module validation is a good way to ensure the accuracy of the global model but cannot validate all the module's interactions (Wallach and Goffinet, 1989).

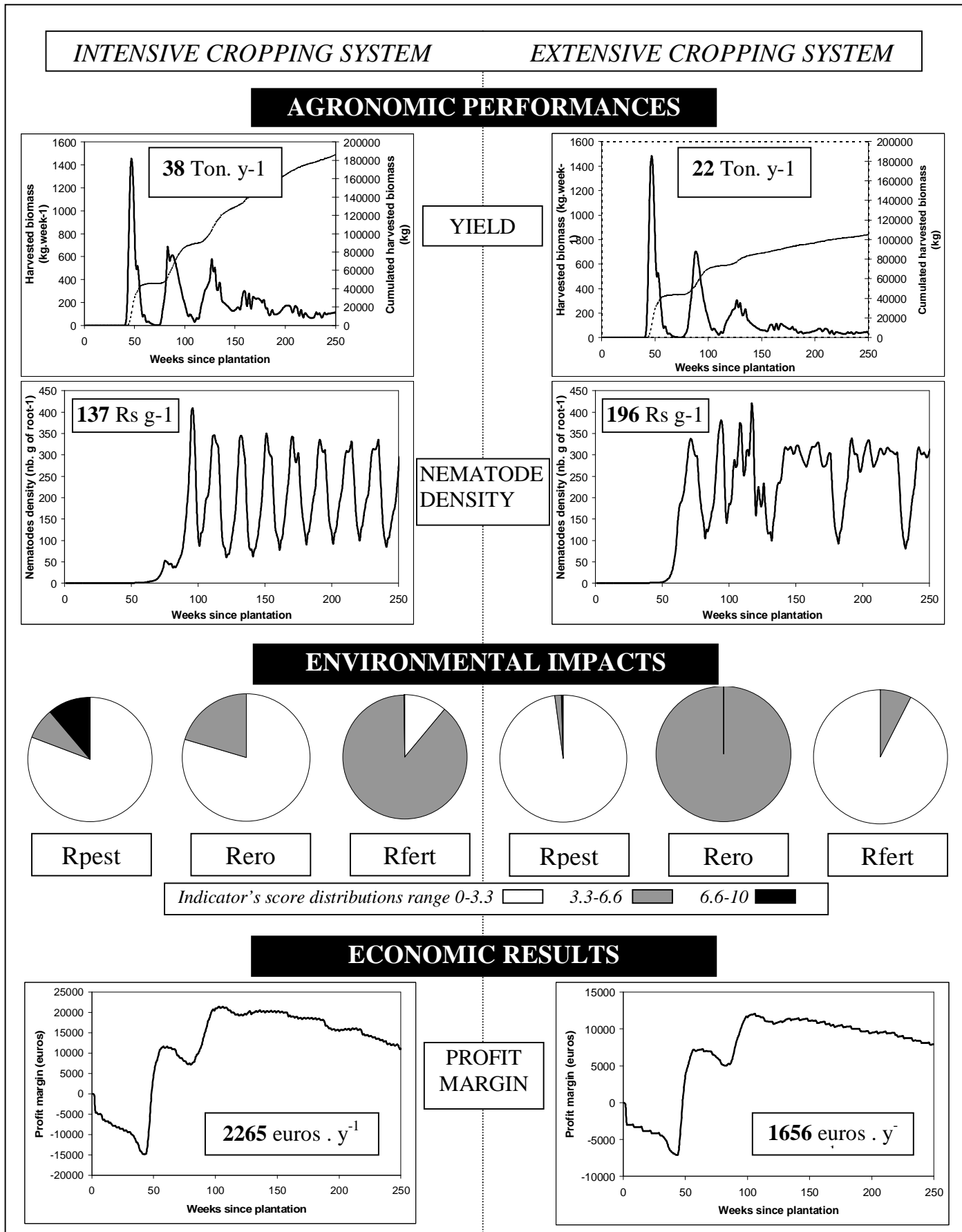
3. Results

Here we present different uses of SIMBA: an evaluation procedure whereby SIMBA is used to compare two cropping systems and a prototyping procedure whereby SIMBA is used to optimize two different cropping systems (monoculture and rotation) using the proposed 2-step method. This method first involves global exploration of key tactical and strategic decision rules that have been achieved for banana monocultures and banana-fallow rotations. Then the second step (accurate optimisation) is performed in the case of a monoculture for a particular strategic decision rule (when to replant) and a tactical decision rule (when to conduct nematicide applications). All simulations presented below are described in **Table 5**.

3.1. Evaluation and comparison of an intensive banana monoculture and a managed fallow–banana rotations

Figure 4 presents a comparison of the control panel of SIMBA for an intensive and an extensive cropping system under the same pedoclimatic conditions (andisol, 250 m elevation, climate of a mean year) for a 250-week simulation period. This control panel allows the comparison of cropping systems, including their dynamics. Intensive systems are more productive but lead to high pesticide pollution and very low fertility. Conversely, extensive systems are less productive, with very low pesticide pollution risk and good soil fertility.

Figure 4. Use of the SIMBA's control panel to evaluate an intensive cropping systems and an extensive cropping system over 250 weeks of simulation at the elevation of 250 meters (simulation I and II in table 5).



3.2. Broad-based prototyping

The two broad-based prototyping we propose here concern a monoculture and a fallow-banana rotation. Both prototypings were performed under fixed pedoclimatic conditions (andisol, 200 m elevation, climate of a mean year and planting in May). The initial simulation parameters (soil, parasitic, environmental and economic) are relative to the studied case (banana monoculture or fallow-banana rotation) and presented in **Table 4**.

Table 4. Initial soil, parasitic, environmental and economic conditions for a banana monoculture and a fallow-banana rotation.

Parameters	After a banana monoculture	After a fallow (0.8 year)
Soil cover (%)	70	100
Soil compaction (score /10)	3.5	2.5
<i>Radopholus similis</i> inoculum (nb. g ⁻¹)	10.00	0.05
Previous crop environmental evaluation (score /10) -		9
Previous crop cost (euros)	-	-400

Table 5. Details of parameters for simulations I to VIII.

N°	Nb. of weeks	Nb. of cycles	Weeks between 2 nematicides	Level of soil mechanisation	Fertilization dose (g); period (w)		Level of plant management	Elevation (meters)
I	250	4	15	1	130	3	1	250
II	250	15	50	3	80	8	3	250
III	500	X	X	X	X	X	X	250
IV	X	X	X	X	X	X	X	250
V	500	X	20	1	130	4	3	250
VI	500	X	20	1	130	4	3	250
VII	500	6	X	1	130	4	3	250
VIII	500	6	X	1	130	4	3	250

X shows the tested variables; 1 for low and 3 for high mechanisation and plant management levels

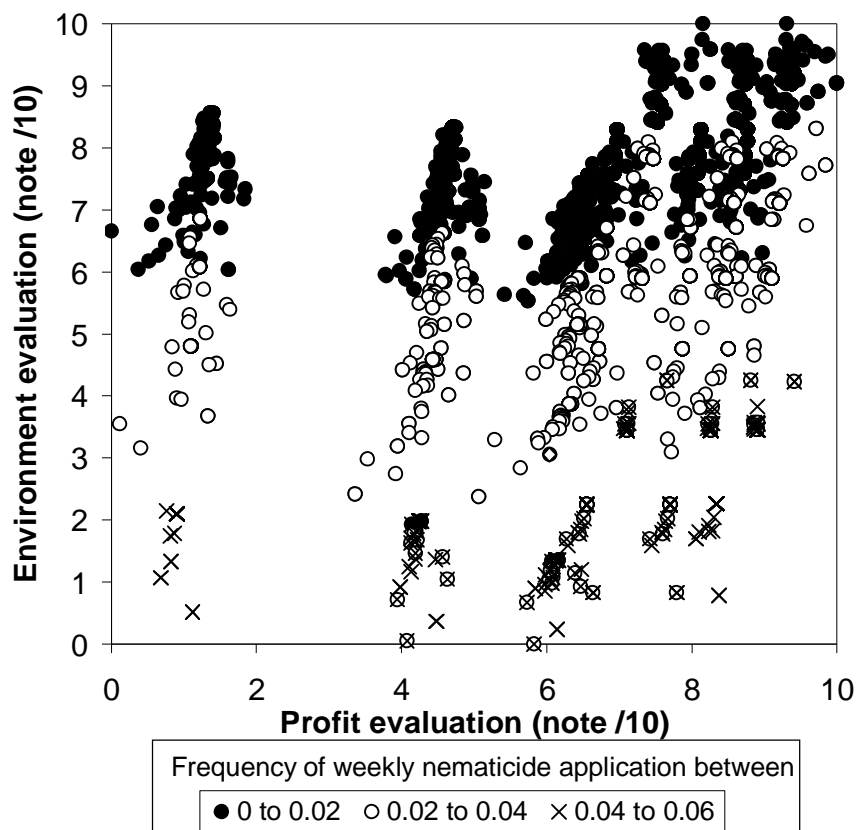
In both cases, 4050 combinations representing all tactical and strategic decision rules were tested (**Tables 1 and 2**; the control variables used for these simulations are in bold).

3.2.1 Monoculture prototyping

The monoculture simulation was done for a 500 week period and the evaluation was performed for this entire period, which could be considered as representative of the tested monocultures.

The 4050 simulations are presented in **Figure 5** for objective 1 (only profit) and objective 4 (environment evaluation). This figure highlights the decision rule sets that lead to the best profit evaluation or environmental evaluation. It also identifies the best trade-offs (upper right corner).

Figure 5. Profit and environmental evaluation of 4050 simulated banana monoculture cropping systems segregated by the number of pesticides applied (simulation III in Table 5).



We selected the first 10 cropping systems for each objective and their associated practices (**Table 6**). From these data, it is possible to conduct an analysis that is geared towards

describing the best systems and gaining insight into what makes them potentially field testable. These results highlighted that:

- In all the kinds of evaluation: two main replanting strategies seem interesting, i.e. frequent replanting (1 or 2 cycles) or semi-frequent replanting (6 to 7 cycles).
- Nematicide application is, in all cases (even for profit), very low (from 1 to 0.7 applications/year).
- Fertilisation is high in profit objectives and lower for environment objectives. A trade-off may be defined.
- There is no ploughing for the environment objective, with ploughing only for plantation for profit objectives.
- The replacement of fallen plants (during culture) is always high.

These features of good banana cropping systems provide some guidelines for sustainable banana monoculture cropping systems.

Table 6. Description of the 10 best banana monoculture cropping systems for the three tested objectives.

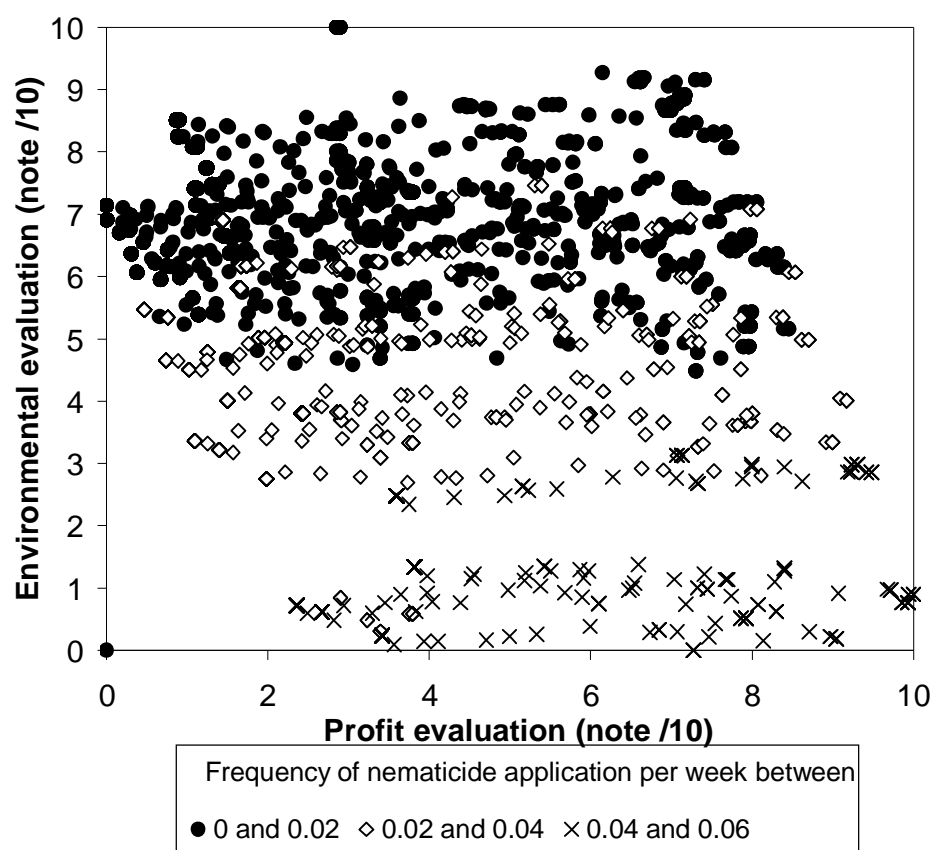
Rank	N°	Nb. of cycles	Weeks between nematocides	Level of soil mechanisation	Fertilization dose (g); period (w)	Level of plant management
Objective 1: only benefit						
1	726	6	90	ploughing for planting	100 ; 5	no replacement
2	1726	1	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
3	3076	1	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
4	3107	2	80	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
5	3092	2	70	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
6	3046	1	40	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
7	696	6	70	ploughing for planting	100 ; 5	no replacement
8	1696	1	40	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
9	727	7	90	ploughing for planting	100 ; 5	no replacement
10	1727	2	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
Objective 2: mostly benefit						
1	3107	2	80	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
2	726	6	90	ploughing for planting	100 ; 5	no replacement
3	1726	1	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
4	3092	2	70	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
5	3076	1	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
6	1773	3	90	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
7	1786	1	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
8	2987	2	100	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
9	3137	2	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
10	591	6	100	ploughing for planting	80 ; 8	no replacement
Objective 3: mostly environmental						
1	2987	2	100	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
2	3107	2	80	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
3	1786	1	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
4	3092	2	70	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
5	3137	2	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
6	2972	2	90	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
7	1773	3	90	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
8	591	6	100	ploughing for planting	80 ; 8	no replacement
9	1591	1	70	no ploughing	100 ; 5	replacement at 15%
10	2941	1	70	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
Objective 4: only environmental						
1	2987	2	100	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
2	2837	2	100	no ploughing	80 ; 8	replacement at 30%
3	2972	2	90	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
4	2822	2	90	no ploughing	80 ; 8	replacement at 30%
5	1786	1	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
6	3137	2	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
7	3136	1	100	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%
8	591	6	100	ploughing for planting	80 ; 8	no replacement
9	1591	1	70	no ploughing	100 ; 5	replacement at 15%
10	2941	1	70	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%

3.2.2 Fallow-banana rotation prototyping

The fallow-banana rotation simulation was done for a 500-week period and the evaluation was performed for the banana-cropping period.

The 4050 simulations and corresponding evaluations are presented in **Figure 6** for the 'only profit' and 'only environment' objectives.

Figure 6. Profit and environmental evaluation of 4050 simulated fallow-banana rotation cropping systems segregated by the number of pesticides applied (simulation IV in Table 5).



Practices associated with the first 10 systems of the 'only profit' evaluation and the first 10 'trade-off scores' are presented in **Table 7**. The only profit objective leads to systems characterized by 3-4 cropping cycles, a high level of nematicide application, mechanisation only at planting, a medium to high level of fertilisation and a low fallen plant replacement threshold. These systems can be considered as intensive. For the trade-off score evaluation,

the main trends for the systems were: 2-3 cropping cycles, a low nematicide application frequency, no ploughing, a low fertilisation level associated with a low replacement level or a high fertilisation level associated with a high replacement level.

Table 7. Description of the 10 best fallow-banana rotation cropping systems only for the profit evaluation and for the most promising trade-off.

Rank	N°	Nb. of cycles	Weeks between nematicides	Level of soil mechanisation	Fertilization dose ; period	Level of plant management
Objective 1: only benefit						
1		4	20	ploughing for planting	130 ; 3	replacement at 15%
2		4	20	ploughing for planting	100 ; 5	replacement at 15%
3		4	20	ploughing for planting	130 ; 3	replacement at 15%
4		4	20	ploughing for planting	80 ; 8	replacement at 15%
6		3	20	ploughing for planting	100 ; 5	replacement at 30%
7		3	20	ploughing for planting	130 ; 3	replacement at 15%
8		3	20	ploughing for planting	100 ; 5	replacement at 30%
9		3	20	ploughing for planting	130 ; 3	replacement at 30%
10		3	20	ploughing for planting	100 ; 5	replacement at 15%
Most promising trade-off						
1		3	80	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
2		3	80	no ploughing	100 ; 5	replacement at 15%
3		3	80	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
4		3	80	no ploughing	80 ; 8	no replacement
5		3	80	no ploughing	80 ; 8	replacement at 15%
6		3	100	no ploughing	80 ; 8	no replacement
7		2	60	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
8		2	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 15%
9		2	60	no ploughing	100 ; 5	replacement at 30%
10		2	60	no ploughing	130 ; 3	replacement at 30%

3.3. Specific optimisation

SIMBA has been used to optimise replanting and nematicide application decision rules, which are very important on the tactical and strategic levels. These optimisations were done for the set of practices highlighted by a previous screening of monoculture systems. This specific optimisation involves testing all possible values for the control variables (two different control variables were tested for each). All possible plantation weeks were tested on the basis of the climate of a mean year, which enables climatic variations to be taken into account (only the mean value of each control variable iteration is considered).

3.3.1 Nematicide application

Hence the nematicide application control variables tested were, successively, the number of weeks between two nematicide applications and the *Radopholus similis* density in banana roots. Both strategies led to different nematicide application dynamics: the first control variable based on systematic applications leads to a regular application plan while the second one based on the simulated nematode density leads to an irregular application pattern that depends on the system itself. We tested a range of 2 to 100 weeks. In the second case, the tested nematode population threshold ranged from 1 to 400 nematodes/g of fresh banana root. **Figure 7** presents four possible evaluations for all tested values of the two possible control variables. This determines the optimum control variable value for each objective and control variable. We determined the optimum values by choosing the best evaluation score or the score when it plateaued (**Figure 7A**). The optimised parameter values for objectives 1 to 4 are, respectively, 10, 10, 470 and 470 nematodes/g of banana root for the control on the basis of the nematode concentration threshold and, respectively, 4, 4, 84 and 84 weeks for the control on the basis of the interval between two applications. Note that in the case of control on the basis of the nematode density, a maximum occurs around 250 (nb. gr-1) for the two trade-offs (mostly profit and mostly environmental objectives).

3.3.2 Banana replanting threshold (yield, weeks)

The control variables used for the replanting of banana were: the number of cropping cycles between two plantings (at regular intervals) and the yield of the last cropping cycle. **Figure 8** presents the four possible evaluations for each control variable value. **Figure 8 A** highlights the optimal number of cycles before replanting. From the only profit evaluation to the only environmental evaluation, the optimal values are, respectively: 4, 4, 6(and over) and 6 (and over) cycles. This decision rule test highlights the fact that relatively frequent replanting is good for profit while over six monoculture cropping cycles gave a better environmental evaluation. **Figure 8 B** presents the test of the decision rule that applies to replanting using the last cycle yield as a control variable. The optimal yield thresholds to activate replanting are, respectively, from the only profit evaluation to the only environmental evaluation, 29, 29, 29 and 20(and lower) t/ha. These results show that 29 t/ha is a central value under which replanting leads to a better profit evaluation. A lower replanting frequency (associated with a lower threshold) only leads to a better environmental evaluation.

Figure 7. Evaluation of a monoculture for all tested values of the two possible control variables that apply to nematicide applications: the interval between applications (A) and the threshold nematode density (B) (simulations V and VI in Table 5).

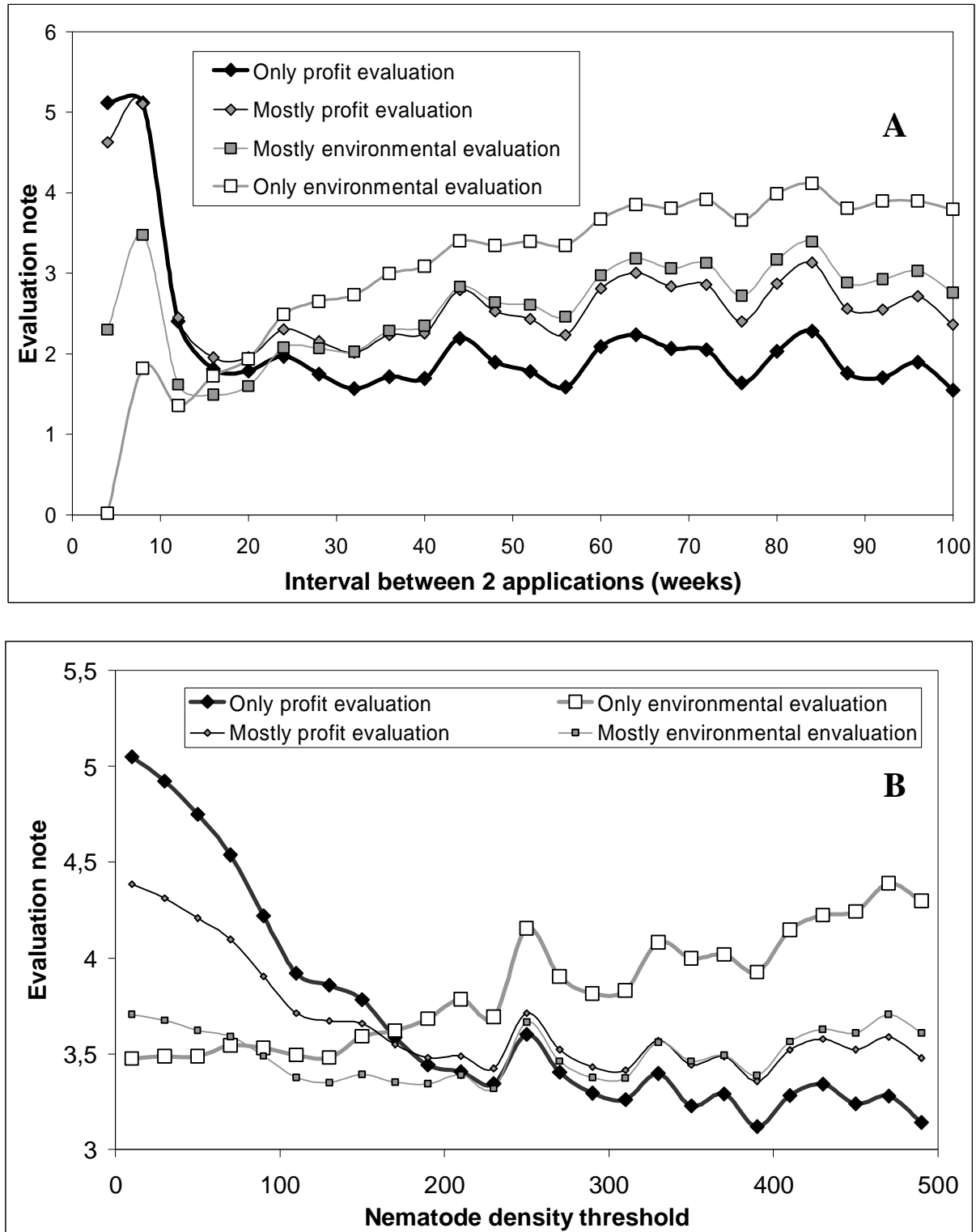
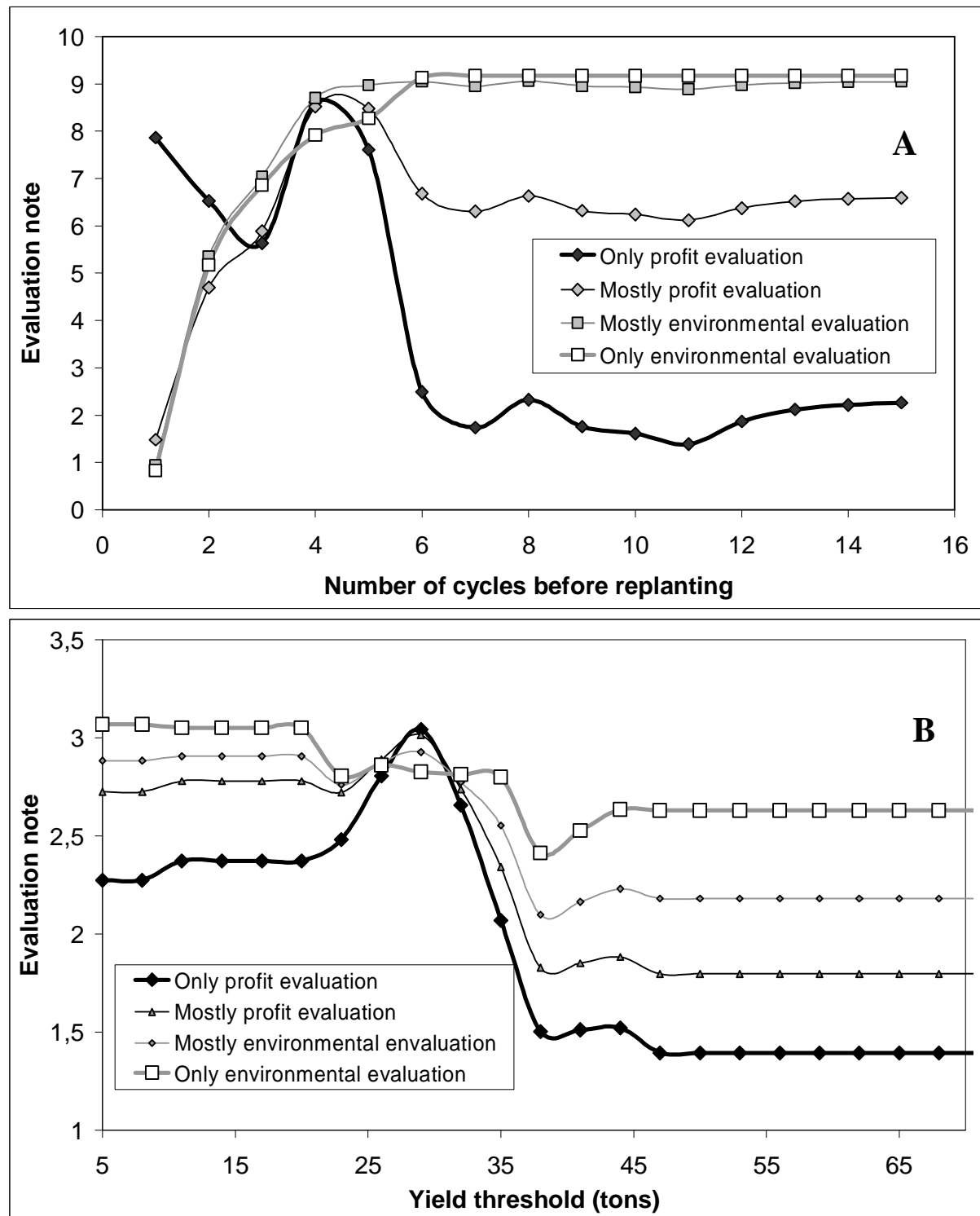


Figure 8. Evaluation of a monoculture for all tested values of the two possible control variables that apply to replanting: number of cropping cycles since planting (A) and yield of the last cropping cycle(B) (simulations VII and VIII in Table 5).



4. Discussion and Prospects

By using the methodology and tools presented in this paper, we were able to simulate and evaluate thousands of banana-based cropping systems. Their suitability on the environmental, agronomic and economic level was evaluated. The SIMBA model and assessment tools can be used to simulate and assess different tactical and strategic decision rules. They can be tested in the case of a broad based prototyping all decision rules combinations or by accurate optimisation. SIMBA can help to reduce pesticides use and control phytoparasitic nematodes, i.e. two major linked factors of agronomic sustainability and environmental risk in the French West Indies. The trade-off evaluations proposed enable selection of systems that could be acceptable for farmers and the environment. The results of the comparative analysis of the systems revealed some interesting areas for improvement of current cropping systems. Both the tactical and strategic optimisations could be potentially effective for reducing pesticide use and to enhance nematode control.

The 2-step prototyping method we proposed (wide screening of potential cropping systems and accurate optimisation of the most promising ones), could be applied to many other systems and with many other cropping system models. This highlighted a group of systems that could be tested on the field, but the most promising systems to test should be selected in collaboration with all stakeholders.

Other model based methods that have been developed are often based only on biophysical models (Loyce et al., 2002^{a,b}; Dogliotti et al., 2004). Here we have taken advantage of currently (or potentially) available biophysical models and of qualitative models for complex or integrated concepts (pesticide risk, soil quality, etc.). This enabled us to assess the systems on the basis of more criteria, thus providing a more realistic viewpoint on the simulated system. As noted by Sage et al. (2003), SIMBA provides a control panel of the system that can be accurately adjusted.

This method does not aim to provide high precision values for each characteristic of the system, but the goal is to sort the systems on the basis of a wide range of objectives. SIMBA shows how models can be involved in the first prototyping phases. It is not meant to replace field experiments but rather to help to choose the most relevant experiments to undertake. The examples we present here highlight only few aspects of SIMBA's potential. Some interesting

tactical and strategic options have already been revealed for different objectives. For instance, strategies that get the best evaluation scores (profit and environment) differ markedly in monocultures and fallow–banana rotations. The use of nematicides is not considered to be a sustainable strategy in monocultures whereas it is in fallow–banana rotations. This phenomenon could be explained by the fact that in monocultures it is not possible to control nematode population growth, whereas nematicides are effective when there are lower initial nematode inoculums with a shorter period. For monocultures, SIMBA proposes a ‘no nematicides’ with a ‘frequent replanting’ strategy. This strategy is perhaps over scored because some phenomena have not yet been taken into account such as the soil organic matter content, which is affected in the case of frequent replanting and could lead to loss of soil fertility. A soil organic matter module is under development to enhance the evaluation potential of SIMBA.

Another module is also under development that will optimise decision rules at each step of the model in order to help reach objectives in specific pedoclimatic environments. Such methods have already been used (Tchamitchian et al. 1998) and can provide a very interesting tool to help farmers manage their fields week by week. Linkage of SIMBA to a GIS would be another interesting prospect to enable users to take landscape constraints into account and evaluate practices at this scale.

Acknowledgements

We are particularly grateful to the farmers of Guadeloupe who helped us to build the plant database used for the calibration and validation modules. We would also like to thank our colleagues from CIRAD-Flhor who helped us by sharing their knowledge especially André Lassoudière and Patrick Quénéhervé.

Bibliography

- Aubry, C., Papy, F., and Capillon, A., 1998. Model decision-making processes for annual crop management. *Agric. Syst.* 56,1 45-65.
- Bergez, J.-E., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leroy P., and Wallach, D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *Europ. J. Agro.* 16,2 123-135.
- Boiffin, J., Malézieux, E., Picard, D., 2001. Cropping systems for the future. In "Crop science: progress and prospects" *CAB international*, (eds J.Nosberger, HH. Geiger, PC Struick), 267-279.
- Bonan, H., Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n°2001-070, 77p.
- Bonin, M., Cattan, P., Malézieux, E., 2004. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux . Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. *C. R. Acad. Agric. A* paraître.
- Brans, J.P., Mareschal, B., Vincke, Ph., 1984. PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. In: Brans, J.P. (Ed.), *Operational Research 84*. North-Holland, New York, pp. 477-490.
- De Wit, C.T., Van Keulen, H., Seligman, N.G., and Spharim, I., 1988. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. *Agric. Syst.* 26, 211-230.
- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H., van Ittersum, M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *Europ. J. Agro.* 19, 239-250.
- Girardin, P., Bockstaller, C., Van der Werf, H., 1999. Indicators : tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *J. Sustain. Agric.* 13, 5-21.
- Loyce, C., 1998. Mise au point d'itinéraires techniques pour un cahier des charges multicritère : le cas de la production de blé éthanol en Champagne crayeuse. Doctoral thesis. INA P-G, 196 p.
- Makowski, D., and Wallach, D., 2001. How to improve model-based decision rules for nitrogen fertilisation. *Europ. J. Agro.* 15, 197-208.
- Meynard, J. M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M. H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817-829.
- Olson, D.L., 2001. Comparison of three multicriteria methods to predict know outcomes. *European Journal of Operational Research* 130 (3), 576-587. *Journal of Operational Research* 81 (2), 281-290.
- Romero, C., and Rehman, T., 1989. Multiple criteria analysis for agricultural decisions. *Developments in agricultural economics*. 5. Elsevier, Amsterdam, 257p.
- Roy, B., and Bouyssou, D., 1993. Aide Multicritère a la Décision: Méthodes et Cas. *Economica*, Paris.
- Sage Jr., R., W., Patten, B., C., et Salmon, P., A., 2003. Institutionalized Model-Making and ecosystem-based management of exploited ressource populations: a comparison with instrument flight. *Ecol. Model.* 170, 107-128.
- Sarty, T.L., 1990. Multicriteria methods. In "The analytical hierarchy process" RSW publication. Pittsburgh PA. 237-248.
- Tchamitchian, M., Henry-Montbroussous, B., Jeannequin, B. and Lagier, J. 1998. SERRISTE: Climate set-point determination for greenhouse tomatoes. *Acta Hort. (ISHS)* 456, 321-328.

- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M., 2004^a. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecol. Model.* 180, 407-417.
- Tixier, P., Malézieux, E., Risède, J-M., Dorel, M., 2004^b. Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes: a contribution to the design of sustainable cropping systems. Submitted to *Ecol. Model.* Registered in july 2004.
- Tixier, P., Malezieux, E., Girardin, P. Bockstaller, C., Dorel, M., 2004^c. Rpest—a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk. Application to banana-based cropping systems in FWI. Submitted to *Ecol. Model.* Registered in july 2004.
- Van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 131-145.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Europ. J. Agro.* 7, 235-250.
- Wallach, D. and Goffinet, B., 1989. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecol. Modell.* 44, 299-306.
- Zander, P., et Kächele, H., 1999. Modelling multiobjectives of land use for sustainable development. *Agric. Syst.* 59, 311-325.

3. Exemple d'utilisation partielle de SIMBA pour optimiser la date de plantation

Avec l'avènement des vitroplants de bananiers la date de plantation d'une bananeraie est devenue beaucoup plus souple. Elle peut s'effectuer pratiquement toute l'année grâce à la possibilité de planter sur sol peu ou pas travaillé. Selon les conditions climatiques le développement des bananiers est plus ou moins rapide et les pics de récolte sont plus ou moins espacés dans le temps. La répartition de ces pics de récolte dans le temps, leur étalement qui devient de plus en plus important et la variation saisonnière du prix de vente de la banane (qui est relativement récurrent d'une année sur l'autre) engendrent des variations potentielles du chiffre d'affaire significatives en fonction des dates et des altitudes de plantation.

Le couplage du module de dynamique des populations des stades de bananiers SIMBA-POP et du module d'évaluation économique de la marge brute SIMBA-ECO a permis d'évaluer le revenu potentiel de chaque date de plantation pour différentes altitudes et ainsi déterminer la ou les périodes de plantation susceptibles de générer le meilleur revenu. La **figure IV.1** présente la variation du revenu potentiel (exprimée en pourcentage par rapport au meilleur mois) pour chaque mois de plantation et pour 3 altitudes pendant 4 ans. Cette figure montre qu'il peut y avoir une variation de plus de 10% de revenus entre le meilleur mois et le moins bon mois de plantation.

Cette utilisation partielle de SIMBA est un bon exemple des apports pratiques de ce modèle. L'optimisation de certaines pratiques sur des critères précis est complémentaire de l'approche globale et multicritère précédemment présentée.

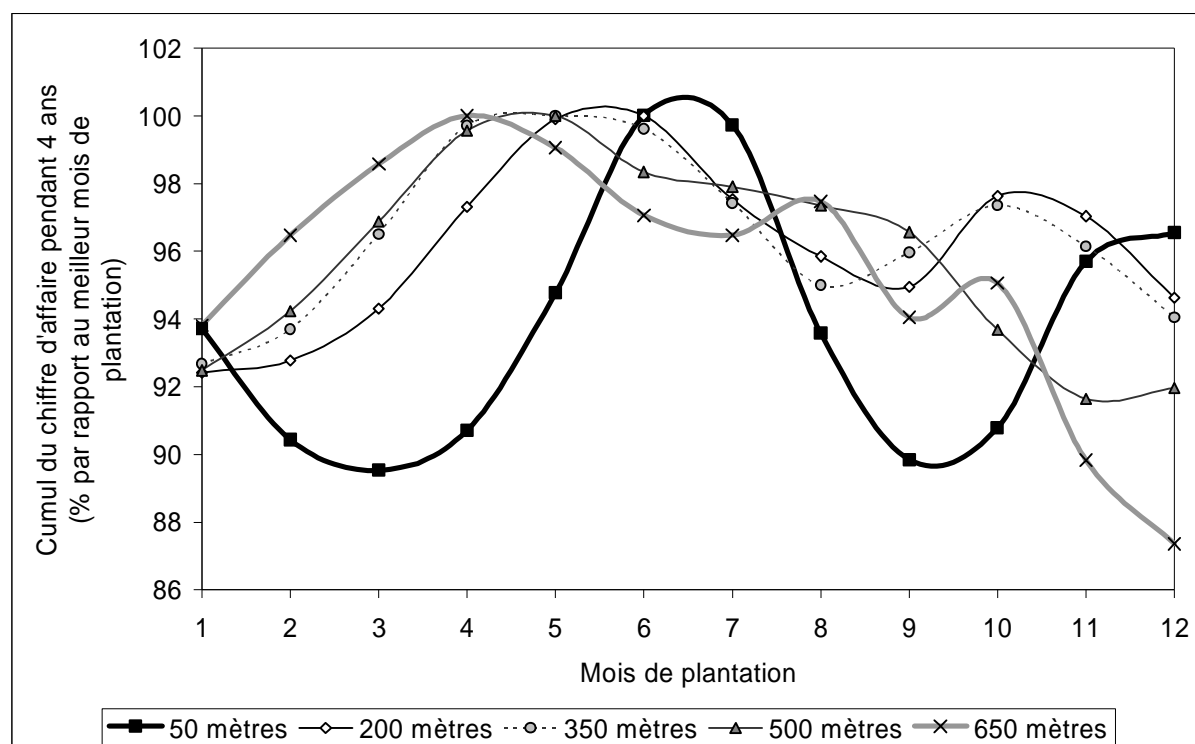


Figure IV-1. Variation du chiffre d'affaire cumulé pendant 4 ans (exprimée en pourcentage par rapport au meilleur mois) pour chaque mois de plantation et pour les altitudes de 50, 200, 350, 500 et 650 mètres.

4. Conclusion du chapitre IV

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthodologie d'utilisation du modèle SIMBA afin d'évaluer et d'aider à la conception de systèmes de cultures plus durables. La méthodologie présentée est basée une description des systèmes de culture simulés par des règles de décision, une analyse multicritère des systèmes de culture et sur deux étapes de prototypage.

Les règles de décision utilisées pour piloter les pratiques culturales sont basées sur des variables de contrôle qui activent les pratiques suivant des règles de décisions de type conditionnelles. L'évaluation multicritère proposée permet d'évaluer les systèmes simulés au niveau environnemental, économique ou par des compromis entre ces deux points de vue.

La première étape du prototypage proposée permet de définir des tendances de systèmes de culture durables en testant la plupart des règles de décisions stratégiques et tactiques pilotant le système de culture. La seconde étape permet d'optimiser ces règles de décision une par une et de tester des variables alternatives de contrôle des règles de décision. Les résultats obtenus en appliquant cette méthodologie ont permis de définir des règles de décision optimisées pour un contexte pédoclimatique donné.

Chapitre V Conclusion et perspectives
--

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord les différents apports méthodologiques et les principaux résultats obtenus. Puis nous discuterons des limites de la démarche mise en œuvre et des moyens possibles pour l'améliorer dans le futur. En guise de conclusion nous tâcherons d'identifier les savoirs manquants qu'il serait nécessaire d'acquérir et les perspectives de recherche consécutives à ce travail.

1. Les apports du travail

Dans un premier temps nous avons développé des outils de simulation et d'évaluation spécifiques des systèmes de cultures à base de bananiers. Cette phase a impliqué un travail transdisciplinaire et de synthèse. Dans un second temps les outils développés ont été utilisés dans le cadre d'une méthodologie de prototypage par modèle afin de définir des tendances puis d'arriver à des systèmes optimisés. D'autres utilisations des outils permettent d'illustrer les utilisations possibles de SIMBA et de ses dérivés.

Le travail qui vient d'être présenté a suscité le développement de diverses approches nouvelles aussi bien au niveau des méthodologies de modélisation et d'évaluation des systèmes de culture qu'au niveau des méthodes permettant de les améliorer.

1.1. Les apports méthodologiques

En modélisation, les innovations sont souvent spécifiques aux caractéristiques des agrosystèmes étudiés. Les outils développés sont de nature non générique. Le module de dynamique du peuplement de bananiers, a permis non seulement la simulation à long terme d'une bananeraie mais aussi celle de phénomènes tels que la dynamique des nématodes phytoparasites. La nature de l'approche de modélisation utilisée, plus couramment utilisés en écologie, a permis de porter un nouveau regard sur le système et sur la manière d'aborder les phénomènes modélisés.

Les éléments suivants apparaissent particulièrement importants :

- la représentation d'un peuplement de bananiers, comme un ensemble de cohortes pilotées par les sommes de température et des lois stochastiques, constitue un élément important. Elle permet d'apporter la dimension de peuplement hétérogène dans les modèles de culture, ce qui n'avait été fait jusqu'alors que pour les modèles forestiers ou d'écologie (Karev, 2003). Cette démarche était nécessaire pour pouvoir simuler les caractéristiques de la bananeraie sur plus d'un cycle de culture,
- la modélisation des nématodes phytoparasites et de leurs impacts sur la culture est l'un des points clés de la prise en compte de la durabilité des systèmes bananiers. La construction de ce modèle a permis de formaliser de manière fonctionnelle les connaissances relatives à ce parasite dans le cadre des systèmes bananiers. Le couplage avec les modules plante constitue une avancée importante dans la compréhension de l'ensemble du système 'hôte - parasite',
- le couplage des indicateurs et du modèle permet une évaluation dynamique des systèmes simulés. Cet outil hybride modèle-indicateur est plus performant que les indicateurs de risques environnementaux 'classiques' principalement par le fait qu'il permet de détecter les périodes de risque ou les fréquences de périodes à risques ce qui est souvent plus pertinent qu'une note moyenne annuelle,
- la méthode de prototypage en 2 étapes (exploration puis optimisation) proposée permet d'accéder à 2 niveaux de précision et d'utiliser le modèle pour déterminer les combinaisons optimales de règles de décision sans avoir un trop grand nombre de combinaisons à tester.

1.2. Les apports du prototypage

L'utilisation de SIMBA n'a pas été exhaustive mais a permis de générer et d'évaluer de nombreux systèmes de culture dans un environnement pédoclimatique donné et d'en déduire

des premières tendances. Parmi les résultats de l'exploration des combinaisons de pratiques avec SIMBA on peut signaler que :

- l'utilisation de nématicides dans les systèmes de monoculture à replantation fréquente n'est pas économiquement performante ni environnementalement durable,
- l'utilisation de nématicides de manière optimisée permet dans des systèmes de rotation avec 1 an de jachère d'avoir une bonne performance économique et des impacts environnementaux limités.

L'optimisation de certaines règles de décision a permis de mieux comprendre leurs impacts sur les différentes composantes du système de culture et d'arriver à des recommandations pratiques telles que les seuils des intervalles entre 2 replantations ou 2 traitements nématicides. Le **tableau V-1** rappelle les principaux paramètres optimisés des règles de décision d'une monoculture de bananier obtenus lors de l'utilisation de SIMBA selon la méthode proposée au chapitre IV.

Tableau V-1. Pratiques sélectionnées lors du prototypage.

Evaluation	Paramètre de la règle de décision	Valeur
Optimum économique	nb. Cycles avant replantation (nb.)	4 à 5
	Seuil de replantation (tonnes par hectare par cycle)	29
	Intervalle entre 2 nématicides (semaines)	4
	Concentration en Rs seuil pour application nématicides (nb. g ⁻¹)	10
Optimum environnemental	nb. Cycles avant replantation (nb.)	6
	Seuil de replantation (tonnes par hectare par cycle)	20
	Intervalle entre 2 nématicides (semaines)	84
	Concentration en Rs seuil pour application nématicides (nb. g ⁻¹)	470

1.3. Modules de SIMBA pouvant donner lieu à des outils pratiques

Les différents outils de modélisation et d'évaluation des systèmes de culture développés ont été pensés pour fonctionner dans le cadre global de SIMBA. Cependant certains de ces modules sont susceptibles d'être utilisés en étant déconnectés du cadre général de travail afin

de répondre à certains problèmes particuliers. Ces outils plus simples pourront dans le futur donner lieu à des outils pratiques permettant de répondre à des questions précises posées par les différents acteurs de la filière banane. Les points suivants présentent ces outils potentiels.

- Le module SIMBA-POP de prévision de la dynamique des récoltes de régimes de bananiers peut être appliqué sur plusieurs parcelles d'une exploitation. Il permettrait d'améliorer la gestion du peuplement de bananiers par le biais de l'œilletonnage et de la plantation vis à vis des besoins en main d'œuvre et de prévoir les exportations plusieurs mois à l'avance.
- L'utilisation couplée de SIMBA-POP et de SIMBA-ECO permet d'optimiser la pratique de l'œilletonnage et le choix de la date de plantation afin de maximiser le revenu. L'utilisation généralisée des vitroplants pour la plantation permet de planter à n'importe quelle période de l'année, contrairement au matériel végétale de plantation classique qui est plus dépendant du travail du sol. La marge de gain possible entre une date optimisée (sur quatre ans) et la moins bonne date est d'environ 10%. Une autre utilisation possible de ces 2 modules est de mieux estimer la perte de revenu liée aux événements climatiques que sont les cyclones. Cet outil pourrait être utilisé par les pouvoirs publics afin d'optimiser les indemnisations.
- Les indicateurs de risques environnementaux développés spécifiquement pour les systèmes bananiers sont susceptibles d'être utilisés seuls et de manière statique et ainsi servir d'outils de diagnostic. Ces outils pourraient notamment servir dans les diagnostics mis en œuvre dans le cadre d'études sur l'analyse des impacts des pratiques agricoles.
- Le module SIMBA-NEM de simulation de la dynamique des nématodes phytoparasites peut être utilisé de manières différentes. Une des utilisations de ce module est de tester la sensibilité aux nématodes de différents hybrides (ou clones) et ainsi disposer d'un outil permettant de mieux comparer les différents hybrides ou d'évaluer leurs besoins en nématicides.

- SIMBA pourrait également être utilisé pour le pilotage des apports d'intrants notamment de produits phytosanitaires nématicides. Pour cela une version spécifique de SIMBA pourrait être développée.

Ces outils pratiques nécessitent des investissements différents pour finaliser leur développement. Certains outils sont déjà réalisés (POP + ECO) et d'autres nécessiteraient un effort plus important (optimisation des intrants).

2. Les limites méthodologiques et la validation de SIMBA

La construction d'un outil aussi global que SIMBA implique des simplifications et un niveau de validation moins spécifique que pour les modèles simulant un nombre réduit de processus. Le principal problème posé par la validation d'un modèle traitant de nombreux aspects est de disposer des jeux de données pour toutes les variables de sorties et de plus sur le long terme. L'objectif de SIMBA étant de comparer les systèmes entre eux, les valeurs absolues des variables de sorties ne sont que secondaires, car c'est la capacité du modèle à trier et différencier les systèmes de culture qui importe. La capacité de comparaison des systèmes simulés n'implique pas forcément un niveau de précision élevé dans l'absolu pour les différentes variables de sortie mais des relations et des pondérations 'réalistes' entre les différents phénomènes impliqués. De plus la capacité du modèle à décrire les différentes dynamiques inhérentes au système (stade des plantes, nématodes, sol...) est un élément clé que la validation des modules de manière indépendante permet d'assurer en partie. Malgré cela, il serait nécessaire à cours terme, de réaliser une validation semi-globale sur certaines sorties comme le rendement. Cette validation permettrait de vérifier que des propriétés émergentes non désirées ne sont pas simulées par le modèle. La capacité prédictive de SIMBA peut notamment être testée dans le cadre des futures expérimentations systèmes. De plus il semble important d'affiner la calibration des stress de croissance, notamment ceux d'origine nutritionnelle et parasitaire. Pour cela des expérimentations spécifiques devront être réalisées.

3. Perspectives

Lors du développement de SIMBA certaines connaissances se sont révélées essentielles mais n'étaient pas disponibles. Le **Tableau V-2** présente les savoirs manquants qu'il serait important de développer afin d'améliorer SIMBA et la connaissance du fonctionnement des systèmes de culture bananiers.

Tableau V-2. Récapitulatif des principales connaissances manquantes et leurs utilisations.

Connaissances à acquérir	Utilisation
Dynamique à long terme de la matière organique dans les sols des bananeraies.	Modélisation de ce compartiment et évaluation de l'impact des systèmes de culture sur une composante de la fertilité du sol.
Mécanismes de nuisibilité des nématodes.	Meilleure estimation du rendement et des chutes.
Phénomène de recontamination des parcelles par les nématodes.	L'analyse de SIMBA-NEM permet de vérifier que ce facteur est clé, d'autant plus si l'on désire prendre en compte la dimension spatiale.
Composante variétale	Evaluer les différents cultivars et les diffuser avec des références simulées sur leur utilisation.
Composante parasitaire liée aux insectes et aux autres pathogènes (Charançons).	Cette composante est complémentaire aux nématodes mais beaucoup plus difficile à simuler.

Ce tableau souligne l'importance de phénomènes peu ou mal connus dont la particularité est d'être intégrés et de jouer sur la durabilité à moyen et long terme des systèmes de culture. De plus la dimension spatiale qui intervient principalement dans les transferts d'eau, de solutés mais aussi des parasites semble être importante à intégrer à la modélisation de ces systèmes de culture. L'autre aspect qu'il faudra développer est la prise en compte des choix stratégiques non seulement à l'échelle de la parcelle mais également à l'échelle de l'exploitation. Ceci

implique la prise en compte de nouvelles contraintes. Il est cependant important de noter que la modélisation à l'échelle de la parcelle reste la brique unitaire nécessaire à un tel travail de modélisation des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation, où un modèle de simulation à l'échelle parcellaire est nécessaire pour générer la base de donnée entrées-sorties (Dogliotti, 2003 ; Belhouchette, 2003). L'objectif principal ne serait plus le prototypage de systèmes de culture mais l'évaluation de nouveaux choix stratégiques des agriculteurs ou de l'effet de nouvelles politiques agricoles.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour SIMBA. La première consiste à valoriser l'outil créé pour l'évaluation de scénarios de systèmes de culture, pour l'optimisation des pratiques et des systèmes existants, ou pour l'exploration virtuelle de nouveaux systèmes, afin de rechercher de nouvelles pistes dans un cadre de durabilité et de multifonctionnalité. Dans le travail présenté dans cette thèse l'utilisation de SIMBA n'est pas complète, seuls quelques exemples d'utilisation ayant été donnés.

Une autre perspective est l'amélioration de SIMBA aussi bien au niveau de la prise en compte de phénomènes complémentaires que sur l'amélioration de la calibration des modules existants. La simulation de la dynamique de la matière organique et son rôle sur les différentes composantes de la fertilité (en particulier sur les pathogènes) représente un enjeu important pour améliorer l'évaluation de la durabilité de ces systèmes. Une autre amélioration serait de paramétrer d'autres cultivars de bananiers et de tester leur pertinence dans diverses situations pédo-climatiques et techniques.

La troisième grande perspective est la prise en compte de la dimension spatiale. Par le couplage de SIMBA avec un Système d'Information Géographique et la modélisation de phénomènes inter-parcellaires (tel les transferts hydriques ou de parasites) il serait possible d'évaluer à l'échelle d'un bassin versant des scénarios de changement de pratiques. Cette perspective de spatialisation présente également l'intérêt de fournir un outil commun pouvant être aussi bien utilisé par les agronomes que par les spécialistes des sciences sociales.

Références bibliographiques

- Allen, R.N., Belinda Dettmann, E., Johns, G ;G ., et Turner, D.W., 1988. Estimation of leaf emergence rate of bananas. *Aust. J. Agric. Res.*, 39, 53-62.
- Asoegwu, S.N., et Obiefuna, J.C., 1986. Effect of irrigation on late season plantains. *Trop. Agric.* 64 :2, 139-143.
- Ator, S.W., Denver, J.M., and Pitchford, A.M. 2000. (EPA) Developing Landscape-Indicator Models for Pesticides and Nutrients in Streams of the Mid-Atlantic Coastal Plain. 4.
- Aubert, B., 1968. Etude préliminaire des phénomènes de transpiration chez le bananier. *Fruits*. 23 :7, 357-381.
- Aubry, C., Papy, F., et Capillon, A., 1998. Model decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*. 56 :1, 45-65.
- Ayanaba, A., Tuckwell, S.B., et Jenkinson, D ;S., 1976. The effects of clearing and cropping on organic reserves and biomass of tropical forest soils. *Soils biology and biochemistry*. 8: 519-525.
- Ayodele, O.J., 1986. Effect of continuous maize-cropping on yield, organic carbon mineralisation and phosphorus supply of savana soils in western Nigeria. *Biology and fertility of soils*. 2, 151-155.
- Barnel, H., 1940. Studies in tropical fruits VIII. Carbohydrate metabolism of the bananafruits during development. *Annals of Botany*. 4 :13, 39-71.
- Belcher, K.W., Boehm, M.M., et Fulton, M.E., 2004. Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agric. Syst.* 79, 225-241.
- Belhouchette, H., 2003. Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie. Utilisation conjointe d'un modèle de culture (CROPSYST), d'un SIG et d'un modèle bio-économique. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 113p.
- Benabdella, B., Albrecht, K.F., Pomaz, V., L., Denisenko, E.,A., and Logofet, D., O., 2003. Markov chain models for forest successions in the Erzgebirge, Germany. *Ecol. Model.*, 159: 145-160.
- Bergé, J.B. Cuany, A. et Bride, J.-M. 1980. Mode d'action des nématicides. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 29 : 149-160.
- Bergez, J.-E., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leroy P., and Wallach, D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *Europ. J. Agro.* 16 :2, 123-135.
- Beugnon, M. Et Champion, J., 1966. Etude sur les racines du bananier. *Fruits*, 21, 309-327.

- Blomme, G., 2000. The interdépendence of root and shoot developement in banana (*Musa spp.*) under field conditions and the influence of different biophysical factors on this relationship. Thèse de l'Université de Catholique de Louvain. 183p.
- Bocchini, S., De Ferrari, G., et Bechini, L., 2001. Application of the Hénin-Dupuis model to georeferenced soil analyses, 2nd International Symposium "Modelling Cropping Systems", European Society for Agronomy, 107-108.
- Bockstaller, C., Girardin, P., et Van der Werf, H., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Europ. J. Agro.* 7, 261-270.
- Bockstaller, C., et Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agric. Syst.* 76, 639-653.
- Boiffin, J., Malezieux, E., et Picard, D., 2001. Cropping systems for the future. In "Crop science: progress and prospects" CAB international, (eds J. Nosberger, H. Geiger, P. C. Struick), 267-279.
- Bonan, H., et Prime, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n°2001-070, 77p.
- Bonhomme, R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' unit. *Eur. J. Agro.*, 12: 1-10.
- Bonin, M., Cattan, P., et Malézieux, E., 2004. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux. Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. *C. R. Acad. Agric. A paraître.*
- Brans, J.P., Mareschal, B., et Vincke, Ph., 1984. PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. In: Brans, J.P. (Ed.), *Operational Research 84*. North-Holland, New York, 477-490.
- Brisson, N., Dorel, M., et Ozier-Lafontaine, H. 1997. Effects of soil management and water regime on the banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model - *Acta Horticulturae*, 229-238
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonielli, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., et Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson, N., et Wery, J., 2002. Introduction aux modèles de culture. Ecole Chercheur Modélisation Le Croisic 14-19 octobre 2002. 20p.

- Cadet, P., et Debouzie, D., 1990. Evolution spatio-temporelle d'un peuplement de nématodes parasites de la canne à sucre. *Revue Nématol.* 13 :1, 79-88.
- Carlier, J., Fouré, E., Gauhl, F., Jones D.R., Lepoivre, P., Mourichon, X., Pasberg-Gauhl C., et Romero, R.A., 1999. Fungal diseases of the foliage, Sigatoka leaf spots. In *Diseases of banana, abacá and enset*. Editor D.R., Jones. Cabi publishing. 37-91.
- Castañera, M.B., Aparicio, J.P., and Gürtler, R.E., 2003. A stage-structured stochastic model of the population dynamics of *Triatoma infestans*, the main vector of Chagas disease, *Ecol. Model.*, 162 : 33-53.
- Cattan et al., 2003 RAPPORT DIREN. 120p.
- Cavelier, A. 1987. Le mode d'action des nématicides non-fumigants. *Agronomie.* 7 :10, 747-762.
- Chabrier, C., 2000. Outils de diagnostic et nouvelles pratiques en culture bananière. *Fruitrop.* 74, 3-5.
- Champion, J., 1963. Le bananier. Blume, Editions Maisonneuve et Larose. 263p.
- Champion, J., et Sioussaram, D., 1970. L'enracinement du bananier dans les conditions de la station de Neufchâteau (Guadeloupe). *Fruits.* 25 :12, 847-859.
- Chaperon, P., L'Hôte, Y., et Vuillaume, G., 1985. Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe. Monographie hydrologique de l'ORSTOM. Ed. ORSTOM. Bondy. 449p.
- Colbach, N., et Huet, P., 1995. Modelling the frequency and severity of root and foot diseases in winter wheat monocultures. *Eur. J. Agron.* 4 :2, 217-227.
- Colmet-Daage, F. et Lagache, P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahier de l'ORSTOM série pédologie.* 8, 91-121.
- Colmet-Daage, F., 1979. Document ORSTOM : carte pédologique de la Guadeloupe.
- Coolen, W.A., and d'Herde, C.J., 1972. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. Ghent state Agriculture Research Center.
- Cornaille, T., 2002. La Guadeloupe en 2001. Publication de l'Institut d'Emission des Départements d'Outre-Mer. ISSN 0534-0713. 213p.
- Cornelissen, A.M.G., van den Berg, J., Koops, W.J., Grossman, M., Udo, H.M.J., 2001. Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86, 173-185.
- Cottin, R., 1987. Modélisation de la production bananière. Influence de quelques paramètres en Martinique. *Fruits,* 42 :12, 691-701.

- Cross, J.V., and Crook, D.J. 1999. Predicting spring emergence of blackcurrant leaf midge (*Dasineura tetensi*) from air temperatures. *Entomologia experimentalis et applicata.*, 91, 421-430.
- Cuevas, E., et Medina, E., 1988. Nutrient dynamics within Amazonian forests. II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. *Oecologia (Berlin)*. 76: 222-235.
- Dave, B., 1994. Lutte contre la végétation adventice en bananeraie. Rapport d'essais et note technique Cirad-Flhor Martinique 1991-1994. 48p.
- Deaton, M.L., and Winebrake, J.J., 2000. Modeling mobile source air pollution inventories. In: M.L. Deaton, J.J. Winbrake (Editors). *Dynamic modeling of environmental systems*, Springer Verlag, New York, 142-157.
- de Lapeyre de Bellaire, L., 2000. Revaloriser la production antillaise par la promotion d'un nouveau segment commercial : « banane sans traitement chimique après récolte ». *Fruitrop*. 74, 24-26.
- Delvaux, B., et Guyot, P., 1989. Caractérisation, de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. *Fruits*. 44 :12, 633-647.
- Delvaux, B., Herbillon, A.J., et Vielvoye, L., 1989. Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon. *Taxonomic, mineralogical and agronomic implication*. *Geoderma*. 45, 375-388.
- De Wit, C.T., Van Keulen, H., Seligman, N.G., and Spharim, I., 1988. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. *Agric. Syst*. 26, 211-230.
- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H., et van Ittersum, M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *Europ. J. Agro*. 19, 239-250.
- Dogliotti, S., van Ittersum, M.K., et Rossing, W.A.H., 2004. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agric. Syst*. In press.
- Dorel, M., et Perrier, X., 1990. Influence des milieux et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. *Fruits*. 45, 237-244.
- Dorel, M., 1991. Problèmes de préparation du sol en bananeraie: cas des sols à halloysite. *Fruits*. 46 :4, 419-427.
- Dorel, M., 1993. Développement du bananierr dans un andosol de Guadeloupe : effet de la compacité du sol. *Fruits*. 48 :2, 83-88.
- Dorel, M., Lafforgues, A., Bretaud, P., et Breton, M., 1996. Etude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. Cirad-Flhor, Guadeloupe. 27p.

- Dorel, M., et Ozier-Lafontaine, H., 1998. Pilotage de l'irrigation des bananeraies sur sols ferrallitiques et sols vertiques en Guadeloupe: recherche d'indicateurs de l'état hydrique de la culture. *Fruits*. 53, 17-26.
- Dorel, M., 2000. Contrats territoriaux d'exploitation (CTE) pour les exploitations bananières de Guadeloupe : proposition pour une mesure « bananeraie pérenne d'altitude ». *Fruitrop*. 74, 6-7.
- Dorel, M., 2001. Effet des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier. Thèse de l'Université catholique de Louvain. 129p.
- Dulcire, M., et Cattan, P., 2002. Monoculture d'exportation et développement agricole durable cas de la banane en Guadeloupe. *Cahiers/Agricultures*. 11, 313-321.
- Duncan, L. W. and H. Ferris. 1982. Interactions between phytophagous nematodes. In D. W. Freckman, ed. *Nematodes in Soil Ecosystems*. University of Texas Press, Austin. 29-51.
- Du Plessi, S.F., 1987. The effect of different NPK level on Groth and nutrient uptake of 'Dwarf Cavendish' banana. *Fruits*. 42 :1, 53-58.
- Ehwaeti, M.,E., Elliott, M.,J., McNicol, J.,M., Phillips, M.,S., et Trudgill, D.,L., 2000. Modelling nematode population growth and damage. *Crop Protection*. 19, 739-745.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., et Dubrovský, M., 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model*. 171, 223-246.
- Enea, M., et Salemi, G., 2001. Fuzzy approach to the environmental impact evaluation. *Ecol. Model*. 135, 131-147.
- Ewel, J., J., 1999. Natural systems as models for the design of sustainable systems of the land use. *Agroforestry Systems*. 45, 1-21.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Publication FAOISBN 92-5-104219-5. 301p.
- Fargette, M., et Quénéhervé, P., 1988. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 1. The nematofauna occuring in the banana producing areas. *Revue Nématol*. 11 :2, 239-244.
- Feller,C., 1994. La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienness. *Agriculture et développement*. 8, 35-41.
- Feller,C., 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1 : recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse de l'Université Louis Pasteur. 247p.

- Fogain, R., et Gowen, S., 1995. Pathogenicity on maize and banana among isolates of *Radopholus similis* from four producing countries of Africa and Asia. *Fruits*. 50 :1, 5-9.
- Fogain, R., Achard, R., Kwa, M., Ferrier, P., et Sarah, J.L., 1996. La lutte contre les nématodes des bananiers au Cameroun : bilan de 10 ans d'étude de l'efficacité de composés nématocides. *Fruits*. 51, 151-161.
- Fogain, R., 2000. Effect of *Radopholus similis* on plant growth and yield of plantain (*Musa*, AAB). *Nematology*, 2 :2, 129-133.
- Follett, R.F., et Schimel, D.S., 1989. Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil science society America J.* 53, 1091-1096.
- Feraro, D., Ghera, C., et Sznajder, G., 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 96, 1-18.
- Freissinet, C., Cunge, J., Erlich, M., et Vauclin, M., 1998. CNFGG Rapport quadriennal 95-98. 261-268.
- Ganry, J., 1973. Etude du développement du système foliaire du bananier en fonction de la température. *Fruits*. 28 :7-8, 499-516.
- Ganry, J., and Meyer, J.P., 1975. Recherche d'une loi d'action de la température sur la croissance des fruits du bananier. *Fruits*, 30 : 6, 375-392
- Ganry, J., 1977. Détermination « *in situ* » du stade de transition entre la phase végétative et la phase florale chez le bananier, utilisant le « coefficient de vitesse de croissance des feuilles ». Essai d'interprétation de quelques processus de développement durant la période florale. *Fruits*. 32:6, 373-386.
- Ganry, J., 1978^a. Recherche d'une méthode d'estimation de la date de récolte du bananier à partir de données climatiques dans les conditions des Antilles. *Fruits*, 33 :10, 669-679.
- Ganry, J., 1978^b. Essai BA-GU-NEU 102. Etude de la dynamique de population des nématodes (*Radopholus similis*) en fonction des conditions climatiques et du stade de développement du bananier. Rapport d'activité CIRAD. 12p.
- Ganry, J., 1980^a. Note de synthèse: Le développement du bananier en relation avec les facteurs du milieu: - Action de la température et du rayonnement d'origine solaire sur la vitesse de croissance des feuilles. Etude du rythme de développement de la plante. *Fruits*. 35 :12, 727-744.
- Ganry, J., 1980^b. Action de la température et du rayonnement d'origine solaire sur la vitesse de croissance des feuilles du bananier (*Musa acuminata* Colla). Application à l'étude du rythme de développement de la plante et relation avec la productivité. Thèse de l'Université Paris VII. 310p.

- Ganry, J., 2001. Maîtrise de la culture bananière pour une production raisonnée face aux nouveaux défis. Comptes rendus d'Académie d'Agriculture de France. 87 :6, 119-127
- Girardin, P., Bockstaller. C., et Van der Werf, H., 1999. Indicators : tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. J. Sustain. Agric. 13, 5-21.
- Girardin, P., Bockstaller. C., et Van der Werf, H., 2000. Assessment of potential impact of agricultural practices on the environment: the AGRO*ECO method. Environmental Impact Assessment Review. 20, 227-239.
- Godefroy, J., Lassoudière, A., Lossois, P., et Penel, J.P., 1978. Action du chaulage sur les caractéristiques physico-chimiques et la productivité d'un sol tourbeux en culture bananière. Fruits. 33:2, 77-90.
- Godefroy, J., et Dormoy, M., 1989. Dynamique des éléments fertilisants dans le complexe 'sol-bananeraie-climat'. Application à la programmation de la fumure. IV. Cas des sols brun à halloysite. Fruits. 44 :1, 3-12.
- Goenaga, R., et Irizarry, H., 1998. Yield of banana grown with supplemental drip-irrigation on ultisol. Expl. Agric. 34, 439-448.
- Goudriaan, J., and van Roermund, H.J.W., 1989. Modelling of ageing, development, delays and dispersion. In: R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. Van Laar (Editors), Simulation and systems management in crop protection, Pudoc, Wageningen, 47-79.
- Gousseland, J., 1983. Etude de l'enracinement et de l'émission racinaire du bananier « Giant cavendish » dans les andosol de Guadeloupe. Fruits. 38 :9, 611-623.
- Gousseland, J., et Lavigne, C., 1984. Enracinement et émission racinaire du bananier (Giant Cavendish CV 901) dans les andosols de la Guadeloupe. Fruits. 39, 107-111.
- Gowen, S., et Quénéhervé, P., 1990. Nématode parasites of bananas, plantains and acaba. In : M. Luc, A. Sikora and J. Bridge (Editors), *Plant parasitic nematodes in subtropical agriculture*. CAB International, 431-460.
- Grugeaux, M.F., 2003. Pollution des terres. Légumes empoisonnés sur les marchés. Sept Magasine. 2 octobre 2003. 1265, 12-13.
- Guerif, J., 1982. La matière organique et son évolution. In : Fertilité du milieu et agriculture Bulletin technique d'information. N°370-372, 443-450.
- Guerrin, F., 2000^a. Simulation of actions to help animal wastes management at the farm level. In: MCPL'2000, IFAC / IFIP / IEEE 2nd Conf. on Management and Control of Production and Logistics. Grenoble (F), 5-8 July 2000, CD Rom : Session R6, 135p.
- Guerrin, F., 2000^b. Magma : a model to help animal manure management at the farm level. In: Agricontrol'2000, Int. Conf. On Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvest Processing. Wageningen (NL), 10-12 July 2000, 159-164.

- Guibaud, G., Baudu, M., et Ayele, J., 1999. Etude du transfert par ruissellement et par drainage de pesticides utilisés sur un verger de pommiers. J. Européen Hydrologie 29, 171-187.
- Guillaume, S., et Charnomordic, B., 2003. La logique floue au service de la vinification: relations entre pratiques et couleur du vin. Acte du colloque Automatique et Agronomie, Montpellier 22-24 janvier 2003. 131-142.
- Guipponi, C., 1998. Environmental evaluation of alternative cropping systems with impact indices of pollution. Europ. J. Agron. 8, 71-82.
- Hannon, B. and Matthias, R., 1999. Multistage insect model. In: B. Hannon and M. Ruth (Editors), Modelling dynamic biological systems, Springer Verlag, New York, 170-180.
- Hegde, D.,M., et Srinivas, K., 1989. Irrigation and nitrogen fertility influences on plant water relations, biomass, and nutrient accumulation and distribution in banana cv. *Robusta*. Journal of Horticultural Science. 64 :1, 91-98.
- Hénin, S., et Dupuis, M., 1945. Annales agronomiques, 15 :1, 1031-1036.
- Hoffmann, H.P., et Turner, D.W., 1993. Soil water deficits reduce the elongation rate emerging banana leaves but the ratio of day/night elongation remains unchanged. Scientia Horticulturae. 24, 1-30.
- Holder, G.D., et Gumbs, F.A., 1982. Effect of irrigation at critical stages of ontogeny of the banan cv. 'Robusta' on growth and yield. Trop. Agric. 59 :3, 221-226.
- Hugon, R., Ganry, J., et Berthe, G., 1984. Dynamique de population du nématode *Radopholus similis* en fonction du stade de développement du bananier et le climat. Fruits. 39 :4, 251-253.
- Hugon, R., et Picard, H., 1988. Relation spatiales entre taches et nécroses racinaires et nématodes endoparasites chez le bananier. Fruits. 33 :9, 491-498.
- Israeli, Y., Schwartz, A., Plaut, Z., et Yadkir, D., 1996. Effect of light regime on $\delta^{13}\text{C}$, photosynthesis and yield of field-grown banana (*Musa sp.*, Musaceae). Plant, cell and environment. 19, 225-230.
- Jamet, P., et Piedallu, M.,A., 1980. Comportement des nématicides organophosphorés et des carbamates dans le sol et la plante étude bibliographique. Phipatrie Phytopharmacie 29, 175-199.
- Jannoyer, M., 1995. Déterminisme du nombre d'organes reproducteurs d'une inflorescence de bananier (*Musa acuminata*, cv 'Grande Naine'). Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 175p.
- Jenkinson, D.S., 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences; 329, 361-368.

- Jenny, C., 2000. Banane : nouvelles variétés. *Fruitrop*. 74, 21-24.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*, 18, 235-265.
- Julien, A., 2000. Croissance, développement et qualité des fruits du bananier (*Musaspp* AAA group cv Cavendish Grande Naine). Modélisation de la répartition des assimilats entre les fruits du régime. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 89p.
- Kermarrec, 1979. Niveau actuel de la contamination des chènes biologiques en Guadeloupe: pesticides et métaux lourds. INRA Guadeloupe/Ministère de l'Agriculture. 155p.
- Khamsouk, B., 2001. Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique de Martinique (cas du sol brun à halloysite). Thèse de l'école nationale supérieure agronomique de Montpellier. 214p.
- Khamsouk, B., De Noni, G., et Roose, E., 2002. New data concerning erosion processes and soil management on andosols from Ecuador and Martinique. Acts of 12th ISCO conference, Beijing 2002. 73-79.
- Khamsouk, B., et Roose, E., 2003. Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. 12 :3, 145-51.
- Karev, G.P., 2003. Inhomogeneous models of tree stand self-thinning. *Ecol. Model.*, 160, 23-37.
- Ke, L.S., 1979. Studies on the physiological characteristics of banan in Taiwan. II. Effects of soil moisture on some physiological functions and yield of banana plant. *J.Agric. Assoc. China*. 108, 11-23.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, S., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Europ. J. Agron.*, 18, 267-288.
- Kropff, MJ, PS Teng and R Rabbinge.1995. The challenge of linking pest and crop models. *Agric. Syst*. 49, 413-434.
- Lacaze, J.G., et Cattan, P., 2002. Analyse des événements pluvieux enregistrés sur Espérance Haut. Document de travail Cirad. 10p.
- Lacoeuilhe, J.J., 1996. Petit glossaire discute. 4p.

- Lahav, E., 1995. Banana nutrition. In Bananas and Plantains. Ed Gowen., Chapman et Hall, London. 258-316.
- Lahav, E., et Lowengart, A., 1998. Water and nutrient efficiency in growing bananas in subtropics. Proc. Int. Symp. Banana in Subtropics. Ed. V. Galan Sauci. Acta Hort. 49, ISHS 1998. 117-123.
- Lassoudière, A., et Maubert, 1971. Evolution des dimensions des bananes entre l'émission de l'inflorescence et la récolte du régime. Fruits. 26 :5, 321-331.
- Lassoudière, A., 1978. Quelques aspects de la croissance et du développement du bananier en Côte d'Ivoire. Le système radical. Fruits, 33:5, 314-338.
- Lassoudière, A., 1978^a. Le bananier et sa culture en Côte d'Ivoire. Connaissance de la plante, interaction avec le milieu écologique. Document IRFA.104p.
- Lassoudière, A., 1978^b. Le bananier et sa culture en Côte d'Ivoire. Techniques culturales. Document IRFA. 247p.
- Lassoudière, A., 1979^a. Comportement du bananier Poyo au second cycle. I- Rejetonnage et multiplication végétative. Fruits, 34 :11, 645-727.
- Lassoudière, A., 1979^b. Comportement du bananier Poyo au second cycle. II- Aspects généraux. Fruits, 34 :12, 713-727.
- Lassoudière, A., 1979^c. Comportement du bananier Poyo au second cycle. III- Etude d'une population. Fruits, 35 (1): 3-17.
- Lassoudière, A., 1979^d. Comportement du bananier Poyo au second cycle. IV- Mise en évidence d'interactions entre rejet et pied mère et entre rejets frères. Fruits, 35 (2): 69-93.
- Lavigne, C., 1987. Contribution à l'étude du système racinaire du bananier. Mise au point de rhizotrons et premiers résultats. Fruits. 42 :5, 265-271.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. Europ. J. Soil Science. 47, 425-437.
- Leclerc,, B., 2001. Guide des matières organiques. ITAB, tome 1. 13-27
- Lecompte, F., 2002. Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effet des contraintes physiques liées au compactage. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 113p.
- Lefroy, E., et Rydberg, T., 2003. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. Ecol. Model. 161, 195-211.
- Levitan, L., 'How to ' and 'why': assessing the enviro-social impacts of pesticides. Crop Protection. 19, 629-636.

- Lombard, K., 2003. Statut organique et fertilité des sols dans les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe. Rapport de stage de 3eme année de l'ENSA de Renne. 50p.
- Loridat, Ph., 1989. Etude de la microflore fongique et des nématodes associés aux nécroses de l'appareil souterrain du bananier en Martinique. Mise en évidence du pouvoir pathogène du genre *Cylindrocladium*. Fruits. 44, 587-597.
- Loyce, C., 1998. Mise au point d'itinéraires techniques pour un cahier des charges multicritère : le cas de la production de blé éthanol en Champagne crayeuse. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 196p.
- Lyon Dahl, A., 2000. Using indicators to measure sustainability : recent methodological and conceptual developments. Mar. Freshwater Res. 51, 477-433.
- Makowski, D., and Wallach, D., 2001. How to improve model-based decision rules for nitrogen fertilisation. Europ. J. Agro. 15, 197-208.
- Malessard, R., 1999. Pré-diagnostic de la filière de production banane en Guadeloupe. Rapport Ciraad-Flhor. 71p.
- Malézieux, E., Dorel, M., et Ganry, J., 2004. Reintroducing agrobiodiversity to design more sustainable banana cropping systems in the French West Indies. In 'VII European Society of Agronomy congress 11-15 july 2004, book of proceedings' Jacobsen, S-E., Jensen, C., R., and Porter, J., editors. 939-940.
- Malkina-Pykh, I., 2002. Integrated assessment models and response function models: pros and cons for sustainable development indices design. Ecological indicators. 2, 93-108.
- Manceron, S., 2004. Modèle MICA banane. CIRAD TERA.
- Manichon, H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon.
- Marie, P., 2000. Culture raisonnée et réduction des coûts de production : vers une production bananière raisonnée et rentable. Fruitrop. 74, 12-15.
- Martiné, J.F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. . Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 131 p.
- Martin-Prével, P., et Montagut, G., 1966. Essais sol plante sur bananier. Dynamique de l'azote dans la croissance et le développement du végétal. Fruits. 21 :6, 283-294.
- Mateille, T., Cadet, P., Quénéhervé, P., 1984. Influence du recépage du bananier Poyo sur le développement des populations de *Radopholus similis* et d'*Helicotylenchus multicinctus*. Revue Nématol. 7 (4) : 355-361.
- Mateille, T., Foncelle, B., et Ferrer, H., 1988. Lutte contre les nématodes du bananier par submersion du sol. Revue Nématol. 11 :2, 235-238.

- Matthiessen, J., 2001. Accelerated degradation of nématicides used on citrus in South Africa. CSIRO report 3, september 2001, 2p.
- Mekwatanakarn, W., 1987. A simulation model of leaf production and flowering in bananas. Thesis of master of science. University of Western Australia. 139p.
- Mekwatanakarn, W., Turner, D.W., 1989. A simple model to estimate the rate of leaf production in bananas in the subtropics. *Scientia Horticulturae*. 40, 53-62.
- Mellilo, J.M., Aber, J.D., et Murador, J.F., 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*. 63, 621-626.
- Meyer, J.P., et Schoch, P.G., 1976. Besoin en eau du bananier aux Antilles. Mesures de l'évapotranspiration maximale. 31 :1; 3-19.
- Meynard, J.M., Doré, T., et Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. Les Entretiens du Pradel 1ère édition. Autour d'Olivier de Serres : Pratiques Agricoles et Pensée Economique - Partie Agronomique; Le Pradel (FRA); 2000/09/28-30. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 87 :4, 223-236.
- Meynard, J.M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.H., et Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie*. 22, 817-829.
- Molina, J.A.E., Clapp, C.E., Shaffer, M.J., Chichester, F.W., et Larson, W.E., 1983. NCSOIL, A Model of Nitrogen and Carbon Transformations in Soil: Description, Calibration, and Behavior. *Soil Science Society of America Journal*. 47 :1.
- Montaigut, G., et Martin-Prével, P., 1965. Besoin en engrais des bananeraies antillaises. *Fruits*. 20 :6, 265-273.
- Mourichon, X., Carlier, J., et Fouré, E., 1997. Les cercosporioses. Fiche technique INIBAP n° 8. 4p.
- Münier, B., Birr-Pedesen, K., et Shou, J.S., 2004. Combined ecological and economical modelling in agricultural land use scenarios. *Ecol. Model*. 174, 5-18.
- Navarro, C., Teisson, C., Côte, F., et Ganry, J., 1994. Effects of lights intensity and CO₂ concentration on growth of banana plants (*Musa* AAA, cultivar 'petite naine') in vitro and subsequent growth following acclimatization. *Scientia Horticulturae*. 60, 41-54.
- Neumann, M., Liess, M., et Shultz, R., 2003^a. An expert system to estimate the pesticide contamination of small streams using benthic macroinvertebrates as bioindicators. *Parti 1. The database of LIMPACT. Ecological Indicators*. 2: 379-389.
- Neumann, M., Baumeister, J., Liess, M., et Shultz, R., 2003^b. An expert system to estimate the pesticide contamination of small streams using benthic macroinvertebrates as

- bioindicators. Parti 2. The knowledge base of LIMPACT. Ecological Indicators. 2, 391-401.
- Odum, H.T. and Odum, E.C., 2000. Energy systems diagramming. In: Modelling for All Scales: An Introduction to System Simulation, H.T. Odum and E.C. Odum. (Editors). Academic Press, San Diego. 19-38.
- Oli, M.K., 2003. Partial life-cycle models: how good are they? Ecol. Model. 169, 313-325.
- Olson, D.L., 2001. Comparison of three multicriteria methods to predict know outcomes. European Journal of Operational Research 130 :3, 576-587.
- Olvera-Velona, A., Benoit, P., Capowiez, Y., Charnay, M.P., et Barriuso, E., 2003. Disponibilité d'insecticides organophosphorés dans les sols agricoles du Mexique et impacts écotoxicologiques sur le vers de terre (*A. Caliginosa*). Actes des 2emes rencontres de l'INRA 4 avril 2003. 2p.
- Palm, C. et Sanchez, P.A., 1991. Nitrogen realease from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. Soil biology and biochemistry. 23, 83-88.
- Parton, W.J., Schimel, D.S. et Cole, C.V., 1989. Modeling soil organic matter dynamics in tropical soils. In Coleman, D.C., Oades, J.M., and Uehara, G. (eds) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems, Honolulu, Hawaii, USA: NifTAL Project.
- Philipps, P., D., Brash, T.E., Yasman, I., Subagyo, P., and van Gardingen, P.R., 2003. An individual-based spatially explicit tree growth model for forests in East Kalimantan (Indonesian Borneo). Ecol. Model., 159, 1-26.
- Phillis, Y.A., et Andiantiatsaholiniaina, L.A., 2001. Sustainability : an ill-definbed concept and its assessment using fuzzy logic. Ecol. Econom. 37, 435-456.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savane. Ministère de la coopération et CIRAD IRAT. Paris, 29-35.
- Price, N.S., 1995. Banana morphology – Part I: roots and rhizomes. In Bananas and Plantains. Ed. Gowen., Chapman et Hall, London. 179-189.
- Quénéhervé, P., 1988. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 2. Influence of soil texture, pH and organic matter in nematode populations. Revue Nématol. 11 :2, 245-251.
- Quénéhervé, P., 1989^a. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 3. Seasonal dynamics of populations in mineral soil. Revue Nématol. 12 :2, 149-160.
- Quénéhervé, P., 1989^b. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 4. Seasonal dynamics of populations in organic soil. Revue Nématol. 12 :2, 161-170.

- Quénéhervé, P., 1989^c. Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 5. Screening of nematicides and horticultural results. *Revue Nématol.* 14 :2, 231-249.
- Quénéhervé, H., 1990. Spatial arrangement of nematodes around the banana plant in the Ivory Coast: related comments on the interaction among concomitant phytophagous nematodes. *Acta Oecologica*, 11 :6, 875-886.
- Quénéhervé, H., 1991. Banana phenology in relation to phytophagous nematodes. In *Biological and integrated control of highland banana and plantain pest diseases. Processings of a research coordination meeting.* C.S. Gold and B. Gemmill editors. Cotonou, Benin, 12-14 November 1991. 218-230.
- Quénéhervé, H., 1993. Nematode management in intensive banana agrosystems : comments and outlook from the Côte d'Ivoire experience. *Crop protection.* 13, 164-172.
- Ram, H.Y.M., Ram, M., et Steward, F.C., 1962. Growth and development of the banana plant. 3 A. The origin of the inflorescence and the development of flowers. B. The structure and development of the fruit. *Annals of Botany.* 26, 657-673.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., et Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United department of agriculture, Agricultural research service (USDA—ARS) Handbook N°703. United States Government Printing Office, Washington, DC.
- Reus, J., Leendertse, P., Bockstaller, C., Fomsgaard, I., Gutsche, V., Lewis, K., Nilsson, C., Pussemier, L., Trevisan, m., Van der Werf, H., Alfarroba, F., Blümel, S., Isart, J., McGrath, D., et Seppälä, T., 2002. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendation for future use. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90, 177-187.
- Rigby, D., Woodhouse, P., Young, T., et Burton, M., 2001. Constructing a farm level indicator of sustainable agricultural practice. *Ecological Economics.* 39, 463-478.
- Riley, J., 2001. Indicator quality for assessment of impact of multidisciplinary systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 87, 121-128.
- Risède, J.,M., et Simoneau, P., 2004. Pathogenic and genetic diversity of soilborne isolates of *Cylindrocladium* from banana cropping systems. *Europ. J. of Plant pathology.* 110, 139-154.
- Robinson, J.,C., et Bower, J.,P., 1987. Transpiration characteristics of banana leaves (cultivar 'Williams') in response to progressive depletion of available soil moisture. *Scientia Horticulturae.* 30, 289-300.
- Robinson, J.,C., et Alberts, A.J., 1987. The influence of undercanopy sprinkler and drip irrigation systems on growth and yield of banana (cultivar 'Williams') in the subtropics. *Scientia Horticulturae.* 32, 49-66.

- Romero, C., and Rehman, T., 1989. Multiple criteria analysis for agricultural decisions. Developments in agricultural economics. 5. Elsevier, Amsterdam, 257p.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., van Ittersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *Europ. J. Agron.* 7, 271-283
- Roy, B., and Bouyssou, D., 1993. Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas. Economica, Paris.
- Russel, E.W., 1973. Soil conditions and plant growth. (10th edn). London, UK/New York, USA: Longman.
- Sage Jr., R., W., Patten, B., C., et Salmon, P., A., 2003. Institutionalized Model-Making and ecosystem-based management of exploited resource populations: a comparison with instrument flight. *Ecol. Model.* 170, 107-128.
- Sánchez-Bayo, F., Baskaran, S., Kennedy, I.R., 2002. Ecological relative risk (EcoRR) : another approach for risk assessment of pesticides in agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91, 37-57.
- Santana, J., L., Suarez, C., L., et Fereres, E., 1993, Evapotranspiration and crop coefficients in banana. *Acta Horticulturae.* 335, 341-348.
- Sarah, J.L., 1986. Répartition spatiale des infestations racinaires de *Radopholus similis* (COBB) en relation avec la croissance et le développement du bananier Poyo en Côte d'Ivoire. *Fruits.* 41 :7-8, 427-435.
- Sarah, J.L., 1993. Variabilité du pouvoir pathogène de *Radopholus similis* entre populations provenant de différentes zones de production du monde.. *Info Musa.* 2 :2, 6.
- Sarah, J.L., 1999. Nematodes pathogens. In *Diseases of Banana, Abaca and Enset.* Jones ed. CABI. Wallingford, UK. 295-323.
- Sarty, T.L., 1990. Multicriteria methods. In "The analytical hierarchy process" RSW publication. Pittsburgh PA. 237-248.
- Saravanan, T., Muthusamy, M., et Marimuthu, T., 2003. Development of integrated approach to manage the fusarial wilt of banana. *Crop Protection.* 22, 1117-1123.
- Savary, S., 1994.. Système, modèle, simulation : applications des concepts de l'analyse des systèmes en protection des cultures. Séminaire modélisation en protection des cultures. Montpellier 1994. 141-156.
- Schoch, P. G. de Villele, O., et Granier, J., 1975. Besoins climatiques en eau des cultures aux Antilles françaises. *Nouv. Agron. Antilles-Guyane.* 1,2 101-108.
- Sébillotte, M., 1982. Fertilité du milieu et agriculture. *Bulletin technique d'information.* N° 370-372. 327-599.

- Sebillotte M. 1990. Some concepts for analysing farming and cropping systems and for understanding their different effects. In: Scaife A (ed), Proceedings of the First Congress of European Society of Agronomy. European Society of Agronomy, 5, 1-16.
- Seinhorst, J., W., 1981. Water consumption of plants attacked by nematodes and mechanisms of growth reduction. *Nematologica* 27, 34-51.
- Shoener, T., W., 1983. Field experiment on interspecific competition. *The american naturalist*. 122 :2, 240-285.
- Silvert, W., 2000. Fuzzy indices of environmental conditions. *Ecol. Model.* 130, 111-119.
- Simon, S., 1991. Essai BA-GU-NEU 155 rapport final. Comparaison des nouveaux nématicides disponibles en Guadeloupe : Aldicarbe, Cadusaphos et Oxamyl. Rapport d'activité CIRAD. 12p.
- Simon-Sylvestre, G., Fournier, J., C., 1980. Les nématicides et la microflore des sols. *Phytotriatrie-phytopharmacie* 29, 161-172.
- Smith, C., McDonald, G., 1998. Assessing the sustainability of agriculture at the planning stage. *J. Environ. Management* 52, 15-37.
- Smith, O. H., Petersen, G. W., Needelman, B. A., 2000. Environmental indicators of agroecosystems. *Advances in Agronomy* 69, 75-97.
- Soltner, D., 1987. Les bases de la production végétale, tome I : le sol, collection Science et techniques agricoles. Anger. 464p.
- Stöckle, C., O., Donatelli, M., et Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy* 18, 289-307
- Stover, R.H., 1984. Canopy management in Valery and Grand Nain using leaf area index and photosynthetically active radiation measurements. *Fruits*. 39 :2, 89-93.
- Subbian, P., Lal, R., Subramanian, K.S., 2000. Cropping systems effects on soil quality in semi-arid tropics. *J. of Sustain. Agr.* 16, 7-38.
- Tchamitchian, M., Henry-Montbroussous, B., Jeannequin, B. and Lagier, J. 1998. SERRISTE: Climate set-point determination for greenhouse tomatoes. *Acta Hort. (ISHS)* 456, 321-328.
- Thomas, D.S., Turner, D.W., et Eamus, D., 1998. Independent effects of the environment on the leaf gas exchange of three banana (*Musa* sp.) cultivars of different genomic constitution. *Scientia Horticulturae*. 75, 41-57.
- Tixier, P. 2000. Catalogue des états de surface du sol des bananeraies du bassin versant de la rivière Pérou en Guadeloupe. CIRAD FLHOR, station de Neufchâteau.
- Tixier, P., Malézieux, E., and Dorel, M., 2004^a. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecol. Model.* 180, 407-417.

- Tixier, P., Malézieux, E., Risède, J-M., Dorel, M., 2004^b. Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes: a contribution to the design of sustainable cropping systems. Summited to Ecol. Model. Soumis en juillet 2004.
- Tixier, P., Malezieux, E., Girardin, P. Bockstaller, C., Dorel, M., 2004^c. Rpest—a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk. Application to banana-based cropping systems in FWI. Summited to Ecol. Model. Soumis en juillet 2004.
- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., et Wery, J., 2004^d. SIMBA a comprehensive model for agro-ecological assessment and prototyping of banana-based cropping systems. An application in the French West Indies. In ‘VII European Society of Agronomy crongress 11-Copenhagen Denmark 15 july 2004, book of proceedings’ Jacobsen, S-E., Jensen, C., R., and Porter, J., editors. 968p. 677-678.
- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., and Wery, J., 2004^e. SIMBA: a comprehensive model for evaluation and prototyping of banana-based cropping systems. Soumis à European Journal of Agronomy, Soumis en November 2004.
- Turner, D.W., et Hunt, N., 1983. The relationship between temperature end rate of appearance of new leaves on thirty banana varieties GRON in the subtropics. Garcia de Orta, Sér. Est. Agron., Lisboa, 10 :1-2, 91-94.
- Turner, D.W., et Lahav, E., 1983. The growth of banana plants in relation with temperature. Aust. J. Plant. Physiol., 10, 43-53.
- Turner, D.W., 1994. Banana and plantain. In Environmental physiology of fruit crop. Vol. 2, 37-64, CRC Press. 206-229.
- Turner, D.W., 1998. Ecophysiology of bananas: the generation and functioning of the leaf canopy. Proc. Symp. Banana in subtropics Ed. V. Galan Sauco. Acta Hort. 4940, ISHS. 211-221.
- Turner, D.W., et Thomas, D.S., 1998a. Measurements of plant and soil water status and their association with leaf gas exchange in banana (*Musa* spp.) : a laticiferous plant. Scientia Horticulturae. 77, 177-193.
- Turner, D.W., et Thomas, D.S., 1998b. Leaf gas exchange of droughted and irrigated banana cv. Williams (*Musa* spp.) Groing in hot, arid conditions. Journal of horticultural sciencee and technology. 73, 419-429.
- Umesh, K.C., Ferris, H., et Bayer, D.E., 1994. Competition between the plant-parasitic nematodes *Pratylenchus neglectus* and *Meloidogyne clitwoodi*. Journal of nemathology. 26 :3, 286-295.
- Vaksman, M., 1988. Elaboration d’un modèle de simulation du bilan hydrique sur sol andique. DRN/88 – Clipsol ES5-101 REU/9. 18p.

- van den Berg, M., Driessen, P.M., Rabbinge, R., 2002. Water uptake in crop growth models for land use systems analysis: II. Comparison of three simple approaches. *Ecol. Model.* 148, 233-250.
- van der Werf, H.M.G., et Zimmer, C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 25-49.
- van der Werf, H.M.G., et Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 131-145.
- van Ittersum, M. K., et Donatelli, M., 2003. Modelling cropping systems - highlights of the symposium and preface to the special issues. *Europ. J. of Agro.* 18, 187-197.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff M.J., Bastiaans L., et Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Europ. J. Agronomy.* 18, 201- 234.
- van Noordwijk, M., et Lusiana, B., 2002. WalNuLCAS version 2.0. Background on a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF), Bogor Indonesia. 186p.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Europ. J. Agro.* 7, 235-250.
- Vilardebó, A., 1984. Problèmes scientifiques posés par *Radopholus similis* et *Cosmopolites sordicus* en cultures bananières des zones francophones de production. *Fruits.* 39 :4, 227-233.
- Waksman, M., 1988. Elaboration d'un modèle de simulation du bilan hydrique sur sol andique. DRN/88, Clipsol ES5-101. 17p.
- Wallach, D. and Goffinet, B., 1989. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecol. Model.*, 44: 299-306.
- Wezel, A., Steinmüller, N., Friederichsen, J.R., 2002. Slope position effects on soil fertility and crop productivity and implications for soil conservation in upland northwest Vietnam. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91, 113-126.
- Wijnands, F.G., 1997. Integrated crop protection and environment exposure to pesticides: methods to reduce use and impact of pesticides in arable farming. *Europ. J. Agro.* 7, 251-260.
- Wilocquet, L., Savary, S., Fernandez, L., Elazegui, F., et Teng, P., 2000. Development and evaluation of a multiple-pest, production situation specific model to simulate yield losses of rice in tropical Asia. *Ecol. Model.* 131, 133–159.
- Woomer, P.L., et Ingram, J.S.I., 1990. The biology and fertility of soils : TSBF Report 1990. Nairobi, Kenya: TSBF.

- Woomer, P.L., Martin, A., Albrecht, A., Resck, D.V.S., et Scharpenseel, H.W., 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. In: P.L. Woomer and M.J. Swift (Editors), *The biological management of tropical soil fertility*, John Wiley and Sons, Chichester, 47-80.
- Young, S.C.H., Sammis, T.W., et Wu, I.P., 1985. Banana yield as affected by deficit irrigation and pattern of lateral layouts. *Am. Soc. Agric. Engineers.* 85, 507-510.
- Zander, P., et Kächele, H., 1999. Modelling multiobjectives of land use for sustainable development. *Agric. Syst.* 59, 311-325.
- Zheng, S.Q., et Cooper, F.F., 1996. Adsorption, desorption, and degradation of three pesticides in different soils. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 30, 15-20.

Prototyping of banana-based cropping systems using models:

An application to cropping systems of Guadeloupe F.W.I.

Philippe Tixier, 2004

Summary

Guadeloupe banana cropping systems are threatened by agronomic (low yield due to phytoparasitic nematode development), environmental (pesticide leaching to water, particularly important in a fragile insular setting) and economic (seasonal variations in fruit prices, manpower costs) unsustainability. New systems have to be designed to solve both economic and environmental problems. Rotations with other crops or fallows, biodiversity restoration, pesticide management are some current investigated solutions.

Modelling tools have been developed to combine practices, explore and optimise such systems. Banana cropping systems have some characteristics that cannot be taken into account by generic crop models; a specific model called SIMBA has been developed. The evolution of the banana population structure over time is a key point; it is simulated by SIMBA-POP, a cohort population model. Parasitism dynamics mainly due to phytoparasitic nematodes lower cropping sustainability and lead to massive use of pesticides; this is simulated by the dynamic SIMBA-NEM module. SIMBA also simulates plant growth, the soil cover and structure or water balance. Cropping practices are taken into account by decision rules that give rise to realistic technical recommendations. Qualitative, integrated and dynamic indicators are linked to biophysical modules and allow evaluation of the pesticide leaching risk, erosion risk and soil fertility. SIMBA provides agronomic (yield), environmental and economic (profit margin) outputs for multicriteria evaluation of the simulated system based on different viewpoints.

An original 2-step method has been used to prototype new cropping systems with SIMBA (first a global exploration then a specific optimisation). Some interesting cropping systems have thus been highlighted and should be tested in the field. This scientific approach permits to develop some significant progress in the banana modelling by aggregating the existing knowledge and highlight the missing ones.

Key-words: Banana cropping systems, Prototyping. Dynamic models, *Musa*, crop population, phytoparasitic nematodes dynamic, environment risks indicators, multicriteria evaluation.

Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables :
Application aux systèmes bananiers de Guadeloupe.
Philippe Tixier, 2004

Résumé

Aujourd'hui, la culture bananière aux Antilles est confrontée à d'importants problèmes agronomiques (rendements faibles à cause du développement important de pathogènes), environnementaux (transport de pesticides et de sol vers les eaux de surface, dans un contexte écologique insulaire fragile) et économiques (variation du prix de vente des fruits et coût de la main d'œuvre élevé) susceptibles de remettre en cause la pérennité de la filière. Dans ce contexte, des systèmes de culture innovants répondant à un nouveau cahier des charges économique et environnemental doivent être mis au point. Plusieurs voies sont explorées qui, au delà d'un mode de conduite raisonné, visent à l'intégration de jachères, de rotations ou de plantes associées.

L'évaluation et la conception de tels systèmes de culture innovants nécessitent l'utilisation d'outils de modélisation spécifiques qui rendent compte des caractéristiques particulières du système. Un modèle spécifique appelé SIMBA a été développé dans ce sens. SIMBA simule l'évolution de la structure du peuplement de bananiers au cours des cycles de culture, point clé qui conditionne l'ensemble de la dynamique du système. La composante parasitaire, qui influe sur la pérennité de la bananeraie et conditionne l'emploi des produits phytosanitaires est également prise en compte. Le parasitisme des nématodes phytoparasites est simulé, en interaction avec la croissance et la structure du peuplement, l'état du sol et l'emploi de nématicides. SIMBA simule également la croissance des bananiers et leur productivité, la structure du sol, la couverture du sol et le bilan hydrique. Des indicateurs qualitatifs et intégrateurs, conçus spécifiquement, permettent, couplés à ces modules biophysiques, l'évaluation au cours du temps de risques environnementaux comme le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et le risque d'érosion. Les pratiques culturales sont prises en compte à travers des règles de décision qu'il est ainsi possible d'évaluer. Le modèle SIMBA, en fournissant des sorties agronomiques, environnementales et économiques (marge brute), permet ainsi l'évaluation multicritère de systèmes de culture simulés selon plusieurs points de vue.

SIMBA a ensuite été utilisé selon une méthode originale de prototypage en deux étapes (exploration globale puis optimisation spécifique). Les résultats obtenus ont permis d'identifier certains systèmes de culture qu'il conviendra de tester 'au champ'. Cette approche systémique et fonctionnelle, qui a permis des avancées significatives au niveau de la modélisation des systèmes bananiers, constitue un outil performant pour la conception de systèmes de culture durables.

Mots-clés : Systèmes de culture bananiers, prototypage, modèle dynamique, *Musa*, simulation d'un peuplement, dynamiques des nématodes phytoparasites, indicateurs de risques environnementaux, évaluation multicritères.